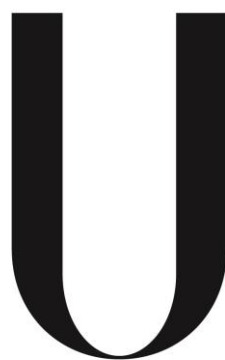


Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**LISBOA**

---

UNIVERSIDADE  
DE LISBOA

**Sistemas Solares Térmicos -  
Sistema Pericial de Ajuda ao Dimensionamento**

**Jorge André Baptista Menezes**

Dissertação

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

**2014**

Universidade de Lisboa  
Faculdade de Ciências  
Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia



**Sistemas Solares Térmicos -  
Sistema Pericial de Ajuda ao Dimensionamento**

**Jorge André Baptista Menezes**

Dissertação de  
Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por Doutor Ricardo Aguiar (LNEG)  
e coorientada por Doutor João Farinha Mendes (FCUL)

**2014**



## Abstract

The proper sizing of solar thermal systems is a procedure which can't be specified by general strict instructions, because there are many factors to consider in each case, such as climatic, technical and economic ones. The designer's capacity to find out quickly a proper sizing for a client's request is something that it's only possible with a lot of experience.

The aim of this work was to explore and propose expert rules and ways of operational implementation to an expert system (in development) for solar thermal systems in a software called Solterm 6, which is designed for computational simulation and analysis of renewable energy systems and it works in MS Excel sheet environment but it has quasi-dynamic simulation algorithms background in MS Visual Basic for Applications.

The used approach was divided by three elementary steps: (i) at first, the serious sizing errors must be avoided; (ii) at the same time, it would be given an advice to the initial configuration of the solar thermal system in response to the conditions introduced by designer; and (iii) finally it gives some hints how to improve energy performance (if it would be necessary), after simulation results.

For this purpose, thousands of energy simulations were made (the economic component has not been considered yet) by Solterm's prototypes in certain standard conditions, such as the minimum requirements set by the Portuguese law namely in "Sistema de Certificação Energética (SCE)", as well as some good practice rules. Then sensitivity analysis studies were made to four main factors: Climate, consumption temperature, consumption pattern and solar thermal collector types. In each case studied, the behavior of the most important parameter in sizing was analyzed – the  $A/V'$  curve (is the ratio between total area of solar thermal collectors, expressed in  $m^2$ , and the total storage volume of the system, expressed in hectoliters) - the most important indicators in solar thermal energy systems: solar fraction, yield, productivity and thermal losses. It was also used in MS EXCEL for the data treatment as well as the data modeling tools and numerical analysis curves of Grapher 9 software.

Generally it is concluded that the sizing curves are adjustable to a kind of exponential curve, with a coefficient of determination,  $R^2$ , equal to or superior than 0,99 with few exceptions (these may be indicators of poor sizing system).

The expert rules that were created (in pre-and post-simulation phases) allow a good approximation to the implementation of an expert system, where stands the systematization created for different commercial collectors, from a maximum rate of productivity characteristic of each collector and restrictions imposed by the differences in climate, temperature and consumer consumption, out of which profile the software will warn the designer that these parameters should be changed.

Key-words: Expert system, solar thermal system, energy performance, energy indicator, Solterm, simulation.

## Resumo

O bom dimensionamento de sistemas solares térmicos é um procedimento para o qual não se podem especificar instruções prescritivas gerais de forma rígida, tal é a quantidade de fatores climáticos, técnicos e económicos a considerar em cada caso específico. A capacidade de um projetista encontrar rapidamente um bom dimensionamento para um pedido de um cliente é algo que só se consegue com muita experiência.

No presente trabalho o objetivo foi explorar e propor regras periciais, e modos de implementação operacional de um sistema pericial (em desenvolvimento) para sistemas solares térmicos, no *software* Solterm 6 concebido para simulação e análise de sistemas renováveis de energia e que funciona em ambiente de folha de cálculo MS Excel mas tem por trás algoritmos de simulação quase-dinâmicos em MS Visual Basic for Applications.

A abordagem utilizada foi (i) evitar logo à partida erros graves de dimensionamento; (ii) aconselhar uma configuração inicial de dimensionamento face às condições impostas ao projetista; e (iii) examinando os resultados de um certo dimensionamento, dar pistas para melhorar o desempenho energético.

Para o efeito, efetuaram-se milhares de simulações energéticas (a componente económica não foi ainda considerada) em protótipos do *software* para certas condições padrão, como o cumprimento de especificações estabelecidas no Sistema de Certificação de Edifícios (SCE) 2013, bem como algumas regras de boas práticas. Foram feitas análise de sensibilidade a quatro fatores principais: clima, temperatura de consumo, perfil de consumo e modelo de coletor. Em cada caso, analisou-se o comportamento do parâmetro mais importante em dimensionamentos – a curva  $A/V'$  (razão entre a área de coletores solares térmicos, expressa em  $m^2$ , e o volume total de armazenamento do sistema, expresso em hectolitros), nos indicadores energéticos mais importantes em sistemas solares térmicos: fração solar, rendimento, produtividade e perdas térmicas.

Foram ainda utilizadas ferramentas de tratamento de dados do MS EXCEL e de modelação e análise numérica de curvas do *software* Grapher 9.

Concluiu-se genericamente que as curvas de dimensionamento são ajustáveis a um tipo de curva exponencial, com coeficiente de determinação,  $R^2$ , superior a 0,99, com escassas exceções (estas poderão ser indicadoras de mau dimensionamento do sistema).

As regras periciais criadas (nas etapas de pré e pós-simulação) permitem uma boa aproximação à implementação de um sistema pericial, donde se destaca a sistematização criada para diferentes coletores comerciais, partindo de um índice de produtividade máxima característico de cada coletor e as restrições impostas pelas diferenças de clima, temperatura de consumo e perfil de consumo, fora das quais o *software* avisará o projetista que estes parâmetros devem ser alterados.

Palavras-chave: Sistema pericial, sistema solar térmico, desempenho energético, indicador energético, Solterm, simulação.

## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Contexto .....	2
1.3	Objetivo da tese .....	5
2	Sistemas Solares Térmicos .....	6
2.1	Funcionamento geral .....	6
2.2	Componentes do Sistema Solar Térmico .....	7
2.2.1	Sistema de captação – Coletor .....	7
2.2.2	Armazenamento.....	10
2.2.3	Circuito primário.....	10
2.2.4	Sistema de apoio .....	12
2.2.5	Outros componentes.....	13
2.3	Procedimentos essenciais num dimensionamento.....	14
2.4	Dificuldades práticas .....	14
3	Conceito de Sistema Pericial .....	16
3.1	Definição geral.....	16
3.2	Vantagens e limitações.....	16
3.3	Componentes do sistema pericial .....	17
3.4	Tipo de sistema pericial a implementar .....	18
4	<i>Software</i> de dimensionamento Solterm 6 .....	19
4.1	Conceitos e generalidades .....	19
4.2	Funcionalidades e base de dados do Solterm 6 .....	20
4.2.1	Entorno .....	20
4.2.2	Dados meteorológicos.....	21
4.2.3	Necessidades AQS e perfil de consumo .....	22
4.2.4	Configuração do sistema solar térmico .....	24
4.2.5	Resultados da simulação .....	25
4.2.6	Outras secções.....	26
4.3	Algoritmos principais do Solterm 6 .....	26
4.4	Validação do Solterm 6.....	29
5	Estudos numéricos de desempenho energético com sistemas solares de referência .....	31
5.1	Objetivo .....	31
5.2	Metodologia .....	31

5.3	Sensibilidade dos indicadores à razão $A/V'$ .....	35
5.4	Sensibilidade ao clima .....	37
5.5	Sensibilidade à temperatura de consumo.....	40
5.6	Sensibilidade ao perfil de consumo.....	42
5.7	Sensibilidade ao modelo de coletor .....	43
5.8	Exploração das relações entre indicadores energéticos .....	46
5.8.1	Rendimento e produtividade .....	47
5.8.2	Rendimento e fração solar .....	48
5.8.3	Rendimento e perdas térmicas .....	50
5.8.4	Produtividade e fração solar .....	52
5.8.5	Produtividade e perdas térmicas .....	54
5.8.6	Fração solar e perdas térmicas.....	56
5.9	Modelação dos indicadores com a razão $A/V'$ .....	58
5.9.1	Sensibilidade ao clima .....	59
5.9.2	Sensibilidade à temperatura de consumo.....	68
5.9.3	Sensibilidade ao perfil de consumo.....	69
5.9.4	Generalização para coletores comerciais.....	70
6	Propostas para regras e operação de um sistema pericial .....	74
6.1	Conceitos .....	74
6.2	Fase de pré-simulação.....	74
6.2.1	Caudal .....	74
6.2.2	Tubagens .....	75
6.2.3	Potência de bombagem.....	76
6.3	Aconselhamento da configuração inicial .....	76
6.3.1	Número de coletores.....	76
6.3.2	Características do depósito .....	76
6.3.3	Limites da relação $A/V'$ .....	77
6.3.4	Outros itens .....	78
6.4	Fase de pós-simulação .....	78
6.5	Implementação operacional .....	80
6.5.1	Relação entre indicadores energéticos .....	80
6.5.2	Sensibilidade dos indicadores à razão $A/V'$ .....	81
6.5.3	Condicionante clima .....	81
6.5.4	Condicionante temperatura de consumo .....	83
6.5.5	Condicionante perfil de consumo .....	84

6.5.6	Condicionante tipo e modelo de coletor.....	85
6.5.7	Sistema de Semáforos .....	85
6.5.8	Opção de desativação .....	86
7	Conclusões.....	88
8	Referências.....	93
Anexos	.....	95



## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Reprodução da TABELA I.09 da Portaria n.º 349-B/2013 do SCE, Espessuras mínimas de isolamentos para equipamentos e depósitos. ....	10
Tabela 2.2 - Valores base de eficiência para equipamentos convencionais de climatização e de produção AQS em edifícios existentes. Despacho n.º 15793-E/2013, Tabela 06 .....	13
Tabela 5.1 - Produtividade limite de coletores comerciais e respetivo fator de qualidade .....	58
Tabela 5.2 - Valores obtidos de parametrização, para o rendimento - Sensibilidade ao clima .....	62
Tabela 5.3 - Valores obtidos de parametrização, para a produtividade - Sensibilidade ao clima .....	64
Tabela 5.4 - Valores obtidos de parametrização, para a transformada da fração solar - Sensibilidade ao clima .....	65
Tabela 5.5 - Valores obtidos de parametrização, para a transformada das perdas térmicas - Sensibilidade ao clima .....	67
Tabela 5.6 - Resultados de parametrização – Sensibilidade a $T_L$ .....	68
Tabela 5.7 - Coeficientes de determinação para cada $T_L$ e indicador energético - Sensibilidade a $T_L$ .....	69
Tabela 5.8 - Resultados de parametrização - Sensibilidade ao perfil de consumo .....	69
Tabela 5.9 - Coeficientes de determinação para cada indicador energético - Sensibilidade ao perfil de consumo .....	70
Tabela 5.10 - Resultados da hipótese testada para coletores comerciais com o fator de produtividade limite característico de cada um .....	71
Tabela 5.11 - Resultados de parametrização - Sensibilidade à utilização de diferentes coletores comerciais .....	72
Tabela 5.12 - Coeficientes de determinação para cada coletor e indicador energético – Coletores comerciais .....	73
Tabela 6.1 – Espessuras mínimas de isolamento de tubagens (mm). Portaria n.º 349-B/2013 Tabela I.07 .....	75
Tabela 6.2 - Intervalos aceites de produtividade e fração solar - Influência do Clima .....	83
Tabela 6.3 - Intervalos aceites de fração solar e perdas térmicas – Sensibilidade à temperatura de consumo .....	83
Tabela 6.4 - Intervalos aceites de fração solar e perdas térmicas – Sensibilidade ao perfil de consumo .....	84

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Esquema de um Sistema Solar para produção de AQS (Baseado em Carvalho, 1998). ...	6
Figura 2.2 - Esquema de um coletor plano (Fonte: <a href="http://www.solarpraxis.com">www.solarpraxis.com</a> ) .....	7
Figura 2.3 - Esquema em termossifão (Fonte: <a href="http://www.painelsolartermico.com">http://www.painelsolartermico.com</a> ) .....	11
Figura 2.4 - Esquema em circulação forçada (Fonte: <a href="http://www.painelsolartermico.com">http://www.painelsolartermico.com</a> ) .....	11
Figura 3.1 - Componentes de um sistema pericial.....	17
Figura 3.2 - Esquema de um sistema pericial integrado.....	18
Figura 4.1 - Layout de apresentação do Solterm - Versão 6.0.30 .....	20
Figura 4.2 - Definição do Entorno local - Solterm 6.0.30.....	21
Figura 4.3 - Banco de dados meteorológicos do Solterm.....	22
Figura 4.4 - Necessidades AQS e perfil de consumo, segundo o REH .....	23
Figura 4.5 - Necessidades AQS e perfil de consumo, personalizados pelo utilizador .....	23
Figura 4.6 - Configuração do sistema solar térmico - Solterm 6.0.0.30 .....	24
Figura 4.7 - Resultados da simulação energética - Solterm 6.0.0.30 .....	25
Figura 4.8 - Esquema conceptual da injeção de calor no depósito a partir dos coletores. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG.....	27
Figura 4.9 - Esquema conceptual da convecção no depósito, dependente das temperaturas das camadas e da bolha aquecida pelo permutador. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG. ....	28
Figura 4.10 - Esquema conceptual da condução de calor no depósito. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG. ....	28
Figura 5.1 - Distribuição de frações, necessidades AQS e perfil de consumo padronizado .....	33
Figura 5.2 – Especificação das características do sistema solar térmico de referência .....	34
Figura 5.3 - Curvas de rendimento em função de $A/V'$ , com variação de A e V separadamente .....	35
Figura 5.4 - Curvas de produtividade em função de $A/V'$ , com variação de A e V separadamente ..	36
Figura 5.5 - Curvas de fração solar em função de $A/V'$ , com variação de A e V separadamente. ....	36
Figura 5.6 - Curvas de perdas térmicas em função de $A/V'$ , com variação de A e V separadamente	37
Figura 5.7 - Curvas de rendimento em função de $A/V'$ , em 3 zonas típicas .....	38
Figura 5.8 - Curvas de produtividade em função de $A/V'$ , em 3 zonas típicas .....	38
Figura 5.9 - Curvas de fração solar em função de $A/V'$ , em 3 zonas típicas .....	39
Figura 5.10 - Curvas de perdas térmicas em função de $A/V'$ , em 3 zonas típicas .....	39
Figura 5.11 - Curvas de rendimento em função de $A/V'$ , para diferentes $T_L$ .....	40
Figura 5.12 - Curvas de produtividade em função de $A/V'$ , para diferentes $T_L$ .....	40
Figura 5.13 - Curvas de fração solar em função de $A/V'$ , para diferentes $T_L$ .....	41
Figura 5.14 - Curvas de perdas térmicas em função de $A/V'$ , para diferentes $T_L$ .....	41
Figura 5.15 - Curvas de rendimento em função de $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo.....	42
Figura 5.16 - Curvas de produtividade em função de $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo .....	42
Figura 5.17 - Curvas de fração solar em função de $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo .....	43
Figura 5.18 - Curvas de perdas térmicas em função de $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo ....	43
Figura 5.19 – Curvas de rendimento em função de $A/V'$ , em diferentes coletores .....	45
Figura 5.20 – Curvas de produtividade em função de $A/V'$ , em diferentes coletores .....	45
Figura 5.21 – Curvas de fração solar em função de $A/V'$ , em diferentes coletores .....	46
Figura 5.22 - Curvas de perdas térmicas totais em função de $A/V'$ , em diferentes coletores.....	46
Figura 5.23 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, em 3 zonas típicas.....	47
Figura 5.24 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes $T_L$ .....	47
Figura 5.25 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes perfis de consumo .....	48
Figura 5.26 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes tipos de coletor .....	48

Figura 5.27 - Curvas de rendimento Vs fração solar, em 3 zonas típicas.....	49
Figura 5.28 - Curvas de rendimento Vs fração solar, para diferentes $T_L$ .....	49
Figura 5.29 - Curvas de rendimento Vs fração solar, para diferentes perfis de consumo .....	50
Figura 5.30 - Curvas de rendimento Vs fração solar para diferentes coletores .....	50
Figura 5.31 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, em 3 zonas típicas.....	51
Figura 5.32 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, para diferentes $T_L$ .....	51
Figura 5.33 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, para diferentes perfis de consumo .....	52
Figura 5.34 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas totais, de diferentes coletores .....	52
Figura 5.35 - Curvas de produtividade Vs fração solar, em 3 zonas típicas.....	53
Figura 5.36 - Curvas de produtividade Vs fração solar, para diferentes $T_L$ .....	53
Figura 5.37 - Curvas de produtividade Vs fração solar, para diferentes perfis de consumo .....	54
Figura 5.38 - Curvas de produtividade Vs fração solar para diferentes coletores .....	54
Figura 5.39 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para 3 zonas típicas.....	55
Figura 5.40 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para diferentes $T_L$ .....	55
Figura 5.41 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para diferentes perfis de consumo .....	55
Figura 5.42 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas totais para diferentes coletores .....	56
Figura 5.43 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para vários coletores comerciais.....	57
Figura 5.44 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas, para diferentes zonas climáticas. ....	57
Figura 5.45 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas, para diferentes temperaturas de consumo .....	57
Figura 5.46 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas totais, para diferentes perfis de consumo.....	58
Figura 5.47 – Ajustes às curvas de rendimento, em função de $A/V'$ - Sensibilidade ao clima.....	59
Figura 5.48 – Ajustes às curvas de produtividade, em função de $A/V'$ - Sensibilidade ao clima.....	60
Figura 5.49 - Linhas de tendência (Fit) às curvas transformadas de fração solar, em função de $A/V'$ - Sensibilidade ao clima .....	61
Figura 5.50 - Linhas de tendência (Fit) às curvas transformadas de perdas térmicas, em função de $A/V'$ - Sensibilidade ao clima .....	61
Figura 5.51 -Variação do parâmetro A do rendimento, com $H_y$ e $G_y$ .....	63
Figura 5.52 - Variação do parâmetro B do rendimento, com $H_y$ e $G_y$ .....	63
Figura 5.53 - Variação do parâmetro C do rendimento, com $H_y$ e $G_y$ .....	64
Figura 5.54 - Variação do parâmetro A da transformada da fração solar, com $H_y$ e $G_y$ .....	66
Figura 5.55 - Variação do parâmetro B da transformada da fração solar, com $H_y$ e $G_y$ .....	67
Figura 5.56 - Variação do parâmetro C da transformada da fração solar, com $H_y$ e $G_y$ .....	67
Figura 6.1 - Curva de Ganho térmico ( $F''$ ) – retirado de Lebeña e Costa, 2006. ....	74
Figura 6.2 – Curvas limite de produtividade com influência do clima .....	82
Figura 6.3 - Curvas limite de fração solar com influência do clima.....	82
Figura 6.4 – Resultados de simulação num dimensionamento padrão com 5 coletores REH .....	85
Figura 6.5 – Caixa de avaliação de desempenho padrão com 5 coletores REH.....	86
Figura 6.6 - Resultados de simulação num dimensionamento padrão com 11 coletores REH.....	86
Figura 6.7 - Caixa de avaliação de desempenho padrão com 11 coletores REH .....	86

## Símbolos

$A$	Área total de coletores solares [ $\text{m}^2$ ]
$V$	Volume total de armazenamento [ $\text{m}^3$ ]
$C_p$	Capacidade calorífica da água a pressão constante [ $\text{J/KgK}$ ]
$C_{p,f}$	Capacidade calorífica do fluido com anticongelante [ $\text{J/KgK}$ ]
$\eta_0$	Rendimento ótico do coletor
$\tau$	Transmissividade da cobertura
$\alpha_b$	Absortividade da placa absorsora
$a_1$	Coeficiente linear de perdas térmicas [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]
$a_2$	Coeficiente quadrático de perdas térmicas [ $\text{W/m}^2\text{K}^2$ ]
$\theta$	Ângulo de incidência [ $^\circ$ ]
$\eta(\theta)$	Rendimento instantâneo dos coletores
$\dot{Q}$	Potência útil à saída do coletor [ $\text{W}$ ]
$K(\theta)$	Função modificadora do ângulo de incidência
$K_{dif,h}$	Função modificadora do ângulo de incidência para a média ponderada da radiação difusa hemisférica
$\theta_l$	Ângulo de incidência projetado na direção longitudinal [ $^\circ$ ]
$\theta_t$	Ângulo de incidência projetado na direção transversal [ $^\circ$ ]
$\alpha$	Azimute do coletor [ $^\circ$ ]
$\beta$	Inclinação do coletor [ $^\circ$ ]
$I$	Radiação direta [ $\text{W/m}^2$ ]
$D$	Radiação difusa celeste [ $\text{W/m}^2$ ]
$R$	Radiação difusa refletida [ $\text{W/m}^2$ ]
$\rho_g$	Albedo do solo
$f_c$	Fator corretivo multiplicativo da radiação solar em coletores não planos
$f$	Fração de radiação difusa de referência
$H_y$	Média anual da irradiação solar global no plano horizontal [ $\text{kWh/m}^2$ ]
$D_y$	Média anual da irradiação solar difusa na horizontal [ $\text{kWh/m}^2$ ]
$G_y$	Média anual da irradiação solar global no plano do coletor [ $\text{kWh/m}^2$ ]
$T_a$	Média da temperatura ambiente [ $\text{K}$ ]
$T_f$	Temperatura média do fluido [ $\text{K}$ ]
$T_e$	Temperatura do fluido à entrada no coletor [ $\text{K}$ ]
$T_s$	Temperatura do fluido à saída no coletor [ $\text{K}$ ]
$T_L$	Temperatura média pretendida no consumo [ $^\circ\text{C}$ ]
$d_1$	Diâmetro da tubagem no circuito primário [ $\text{mm}$ ]
$d_2$	Diâmetro da tubagem no circuito secundário (ou de distribuição) [ $\text{mm}$ ]
$h_1$	Espessura do isolamento da tubagem no circuito primário [ $\text{mm}$ ]
$h_2$	Espessura do isolamento da tubagem no circuito secundário (ou de distribuição) [ $\text{mm}$ ]
$l_1$	Comprimento total da tubagem no circuito primário [ $\text{mm}$ ]

$l_2$	Comprimento total da tubagem no circuito secundário (ou de distribuição) [mm]
$\dot{m}$	Caudal específico no circuito primário [kg/m <sup>2</sup> s]
$U_{dep}$	Coeficiente global de perdas térmicas depósito [W/K]
$U'_{dep}$	Coeficiente global de perdas térmicas depósito por unidade de área [W/m <sup>2</sup> K]
$V_{dep}$	Volume útil do depósito [l]
$h_{ext}$	Altura do depósito (exterior) [l]
$d_{ext}$	Diâmetro do depósito (exterior) [l]
$E_s$	Energia final de origem solar fornecida pelo sistema (anual) [kWh]
$E_a$	Energia final de origem no apoio energético fornecida pelo sistema (anual) [kWh]
$P_0$	Energia final perdida total (anual) [kWh]
$P_1$	Energia final perdida no circuito primário (anual) [kWh]
$P_2$	Energia final perdida no armazenamento (anual) [kWh]
$P_3$	Energia final perdida no circuito secundário (anual) [kWh]
$P_4$	Consumo parasítico das bombas (anual) [kWh]
$L$	Energia útil solicitada ao consumo (carga térmica) [kWh]
$\rho_s$	Rendimento do sistema solar [%]
$\pi_s$	Produtividade do sistema solar [kWh/m <sup>2</sup> ]
$f_s$	Fração solar [%]
$f'_s$	Função transformada da fração solar [%]
$\psi$	Perdas térmicas relativas [%]
$\psi'$	Perdas térmicas totais [%]
$\psi''$	Função transformada das perdas térmicas relativas [%]
$\pi_{s(max)}$	Produtividade limite do coletor [kWh/m <sup>2</sup> ]
$f_\pi$	Fator de produtividade máxima do coletor [kWh/m <sup>2</sup> ]
$P_{bomb}$	Potência de bombagem da bomba de circulação [W]
$U_L$	Coeficiente global de perdas do coletor [W/m <sup>2</sup> K]

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer a todas as pessoas que foram importantes, a nível pessoal e/ou técnico, seja de forma direta ou num sentido mais amplo que me ajudaram à realização deste trabalho. Agradeço, ao orientador, Doutor Ricardo Aguiar, por possibilitar-me esta oportunidade, pela enorme paciência e confiança ao longo do trabalho bem como por me disponibilizar todas as ferramentas necessárias à execução do mesmo e por me ter ajudado a evoluir com os erros que fui cometendo. Coincidência ou não, o gosto que partilhamos pela corrida fez esta Dissertação parecer uma Maratona. Espero que tenha atingido os mínimos para os Jogos Olímpicos.

Agradeço, ao coorientador, Doutor Farinha Mendes, por ter encaminhado e apresentado o interessante tema que me foi proposto, assim como a sua disponibilidade sempre que foi solicitado. O meu interesse pela energia solar térmica, também foi fomentado pelas suas aulas e pelas ferramentas que disponibilizou durante a referida unidade curricular, talvez sem as quais não teria seguido este caminho.

Os meus sinceros agradecimentos a todos os meus amigos(as) de longa data, que sempre estiveram presentes nos bons e maus momentos e de forma mais direta os meus colegas de curso que se tornaram também eles meus amigos e que me ajudaram não só no decorrer deste trabalho bem como durante o ciclo de estudos.

Por fim, quero deixar um agradecimento especial à minha família mais próxima, pois são o suporte com o qual tudo o resto se torna possível, inclusive a realização deste trabalho.

## 1 Introdução

### 1.1 Motivação

O correto dimensionamento de sistemas solares térmicos é importante para assegurar a satisfação do utilizador otimizando ao mesmo tempo numerosas vertentes do desempenho do sistema, principalmente: maximização do aproveitamento da energia solar, poupanças no uso de energia não-renovável, custos económicos, longevidade do sistema, e segurança.

Existem regulamentos para as componentes hidráulicas e elétricas, bem como para a Qualidade. Por exemplo, para a espessura e diâmetro de tubagens, para a preparação de AQS, certificação de coletores, ou para a eficiência de equipamentos convencionais de produção de AQS (MAOTE, 2013a, b).

Seja como for, a obediência nominal a regulamentos, nomeadamente mas não apenas de segurança e qualidade, não implica que sejam asseguradas boas práticas de dimensionamento. Isto pode levar a um mau desempenho energético do sistema solar, com reflexos é claro na otimização e mesmo na viabilidade económica. Por exemplo, um sistema solar térmico pode estar sob ou sobredimensionado em termos de quantidade de coletores, face ao consumo exigido e/ou ao tipo de clima onde se insere.

No entanto é difícil providenciar regras rígidas de dimensionamento energético – e portanto muito difícil elaborar regulamentos que os integrem – dada a grande variedade de parâmetros envolvidos, com destaque para as características do clima e do recurso solar, características de equipamento comercial (coletores, depósitos, etc.) e características do consumo (temperaturas-alvo, perfis de volumes diários, semanais, e sazonais).

Por outro lado, hoje em dia a maior parte dos dimensionamentos é assistida por computador, portanto utilizando *software* especializado de engenharia. Assim o projetista dispõe de ferramentas de cálculo que permitem implementar com bastante facilidade todas as regras e regulamentos existentes mas ainda assim terá de fazer “manualmente” a otimização do dimensionamento. Se há casos em que o projetista tem os conhecimentos e experiência adequados, muitos outros haverá em que o projetista se limita a acolher cegamente as escolhas do *software*. Estas escolhas nem sempre serão corretas dado o que acima se discutiu, e aliás, muitas vezes são valores por defeito apresentados apenas com a intenção de serem início de um processo aperfeiçoamento cíclico do dimensionamento mas não como seu resultado final.

Assim, há grande interesse em dotar o *software* especializado em sistemas solares de um sistema pericial, i.e. de aconselhamento e ajuda ao dimensionamento energético (e económico).

## 1.2 Contexto

De acordo com a legislação portuguesa, no projeto de edifícios de habitação e de edifícios de comércio e serviços, devem ser respeitados regulamentos que têm entre os seus objetivos assegurar que os requisitos para o conforto térmico – seja ele de aquecimento ou de arrefecimento – de ventilação para garantia de qualidade do ar no interior dos edifícios, e as necessidades de água quente sanitária (AQS), possam vir a ser satisfeitos, evitando desperdício excessivo de energia.

À data de início deste trabalho, vigoravam os Decretos-Lei n.º 78/2006, n.º 79/2006 e n.º 80/2006 que aprovavam, respetivamente, o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Entretanto, no decorrer desta Tese e já com alguns resultados baseados nestes regulamentos, entrou em vigor no dia 1 de dezembro de 2013, o Decreto-Lei n.º 118/2013, que aprovou o Sistema de Certificação de Edifícios (SCE), e que visa atualizar os anteriores acima referidos, ainda que, com orientações semelhantes, com vista a cumprir os objetivos acordados pelos Estados-Membros da União Europeia (UE) para 2020.

Começa-se por referir o enquadramento legislativo principal desta Dissertação. Transcreve-se o Artigo 27.º - Eficiência dos sistemas técnicos, do Decreto-Lei n.º 118/2013:

“1 - Os sistemas técnicos a instalar nos edifícios de habitação novos para aquecimento ambiente, para arrefecimento ambiente e para preparação de água quente sanitária, devem cumprir os requisitos de eficiência ou outros estabelecidos em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia.

2 - A instalação de sistemas solares térmicos para aquecimento de água sanitária nos edifícios novos é obrigatória sempre que haja exposição solar adequada, de acordo com as seguintes regras:

a) A energia fornecida pelo sistema solar térmico a instalar tem de ser igual ou superior à obtida com um sistema solar constituído por coletores padrão, com as características que constam em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia e calculado para o número de ocupantes convencional definido pela entidade fiscalizadora responsável do SCE, na razão de um coletor padrão por habitante convencional;

b) O valor da área total de coletores pode, mediante justificação fundamentada, ser reduzido de forma a não ultrapassar 50% da área de cobertura com exposição solar adequada;

c) No caso de o sistema solar térmico se destinar adicionalmente à climatização do ambiente interior, deve salvaguardar-se que a contribuição deste sistema seja prioritariamente na preparação de água quente sanitária.

3 - Em alternativa à utilização de sistemas solares térmicos prevista no número anterior, podem ser considerados outros sistemas de aproveitamento de energias renováveis que visem assegurar, numa base anual, a obtenção de energia equivalente ao sistema solar térmico.



4 - A contribuição de sistemas de aproveitamento de energia renovável para o desempenho energético dos edifícios de habitação novos só pode ser contabilizada, para efeitos do presente regulamento, mediante cumprimento do disposto portaria do membro do Governo responsável pela área da energia em termos de requisitos de qualidade dos sistemas, e calculada a respetiva contribuição de acordo com as regras estabelecida para o efeito pela DGEG (Direção-Geral de Energia e Geologia).

5 - O valor das necessidades nominais anuais de energia primária (N<sub>tc</sub>) de um edifício de habitação novo, calculado de acordo com o definido pela DGEG, não pode exceder o valor máximo das necessidades nominais anuais de energia primária (N<sub>t</sub>) definido em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia.

6 - As moradias unifamiliares novas com uma área útil inferior a 50 m<sup>2</sup> estão dispensadas da do cumprimento do disposto no número anterior.”

De forma similar, para além do caso dos edifícios novos, diz o Artigo 29.º - Eficiência dos sistemas técnicos de edifícios sujeitos a grande intervenção, do Decreto-Lei n.º 118/2013:

“1 - Os componentes instalados, intervencionados ou substituídos em sistemas técnicos devem cumprir os requisitos de eficiência e outros definidos em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia.

2 - A instalação de sistemas solares térmicos para aquecimento de água sanitária num edifício sujeito a grande intervenção é obrigatória sempre que haja exposição solar adequada e desde que os sistemas de produção e de distribuição de água quente sanitária sejam parte dessa intervenção, de acordo com as seguintes regras:

a) A energia fornecida pelo sistema solar térmico a instalar tem de ser igual ou superior à obtida com um sistema solar de coletores padrão com as características que constam de portaria calculado para o número do membro do Governo responsável pela área da energia e de ocupantes convencional definido pela DGEG, na razão de um coletor padrão por habitante convencional;

b) O valor da área total de coletores pode, mediante justificação fundamentada, ser reduzido de forma a não ultrapassar 50% da área de cobertura com exposição solar adequada;

c) No caso do sistema solar térmico se destinar adicionalmente à climatização do ambiente interior da habitação, deve ser salvaguardado que a contribuição deste sistema seja prioritariamente para a preparação de água quente sanitária e que a mesma seja considerada para efeitos do disposto nas alíneas anteriores.

3 - Em alternativa à utilização de sistemas solares térmicos prevista no número anterior, podem ser considerados outros sistemas de aproveitamento de energias renováveis que garantam, numa base anual, energia equivalente ao sistema solar térmico.

4 - A contribuição de sistemas de aproveitamento de energia renovável para a avaliação energética de um edifício sujeito a grande intervenção, e independentemente da dimensão dessa intervenção, só pode ser contabilizada, para efeitos do presente capítulo, mediante o

cumprimento do disposto em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia, em termos de requisitos de qualidade, e calculando a respetiva contribuição de acordo com as regras definidas para o efeito pela DGEG.

5 - Nas situações previstas nos n.ºs 1 a 3 em que existam incompatibilidades de ordem técnica, funcional, de viabilidade económica ou de valor arquitetónico com o cumprimento dos requisitos aí previstos, bem como com a instalação dos sistemas a que se refere o n.º 3, pode o técnico autor do projeto optar pelo cumprimento parcial ou não cumprimento dos referidos requisitos, desde que, para isso:

- a) Justifique as incompatibilidades existentes e a impossibilidade de cumprimento dos requisitos aplicáveis;
- b) Demonstre que, com as soluções alternativas preconizadas, o desempenho do edifício não diminui em relação à situação anterior à grande intervenção;
- c) As situações de incompatibilidade, respetivas soluções alternativas e potenciais consequências sejam expressamente mencionadas no pré-certificado e no certificado SCE, quando for caso disso.

6 - A razão entre o valor de  $N_{tc}$  de um edifício de habitação sujeito a grande intervenção, calculado de acordo com o previsto pela DGEG e o valor de  $N_t$  não pode exceder o estabelecido em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia, exceto nas situações previstas no número anterior.

7 - Os sistemas técnicos a instalar em edifícios sujeitos a ampliação devem cumprir com o disposto no n.º 1”

Os Artigos, acima transcritos, referem-se à obrigatoriedade e às condições de instalação de sistemas solares térmicos, com exceção, respetivamente, dos pontos 4 e 5 e 4 e 6, dos Artigos 27.º e 29.º

Os cálculos da DGEG a que se refere o SCE podem ser encontrados no Despacho n.º 15793-H/2013, que esclarece:

#### “1. SISTEMAS SOLARES TÉRMICOS

A energia produzida pelo sistema solar térmico, deve ser determinada com recurso à versão em vigor do programa Solterm do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) ou outra ferramenta que utilize metodologia de cálculo equivalente que permita, quando aplicável, quantificar essa energia para diversos usos, devidamente validada por entidade competente designada para o efeito pelo ministério responsável pela área da energia.

#### 2. SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS

1 - A energia produzida pelo sistema solar fotovoltaico, deve ser determinada com recurso à versão em vigor do programa Solterm do LNEG ou outra ferramenta que utilize metodologia de cálculo equivalente, devidamente validada por entidade competente designada para o efeito pelo ministério responsável pela área da energia.

2 - Nos casos em que o sistema fotovoltaico esteja associado a várias frações, a contribuição renovável para cada uma das frações autónomas deverá ser repartida em função da sua permilagem.”

Ora o *software* Solterm (até à presente data a última versão é 5.1.4) possui apenas algumas verificações regulamentares e de boas práticas básicas, não um verdadeiro sistema pericial que ajude a encontrar bons dimensionamentos energéticos.

### **1.3 Objetivo da tese**

À data de início deste trabalho estava em preparação a versão 6 do Solterm, compatível com o novo SCE (Dec. Lei nº 118/2013) sendo pois uma boa ocasião para o dotar de um sistema pericial de ajuda ao dimensionamento energético.

Assim o objetivo do trabalho em que esta tese se baseia é conceber e propor para implementação no Solterm 6 um sistema pericial para ajuda ao dimensionamento energético, operando nas seguintes etapas:

- Impedir erros graves de dimensionamento na especificação das componentes e condições de operação do sistema (fase pré-simulação energética do sistema solar);
- Responder a eventuais resultados insatisfatórios detetados nas estimativas de desempenho energético obtidas e aconselhando alterações na especificação de parâmetros do sistema solar, (fase pós-simulação energética do sistema solar), preparando um novo ciclo de otimização do dimensionamento energético.

## 2 Sistemas Solares Térmicos

### 2.1 Funcionamento geral

Um sistema solar térmico, utilizado para produção de águas quentes é constituído, regra geral, por três componentes principais (Carvalho, 1998):

- Coletores;
- Armazenamento;
- Sistema de apoio

A transferência de energia entre cada uma destas componentes é assegurada pelos circuitos:

- Primário – transferência da energia captada nos coletores para o armazenamento;
- Secundário ou de distribuição – transferência da energia do armazenamento para o consumo.

A Fig. 2.1, mostra um esquema de um sistema solar térmico típico.

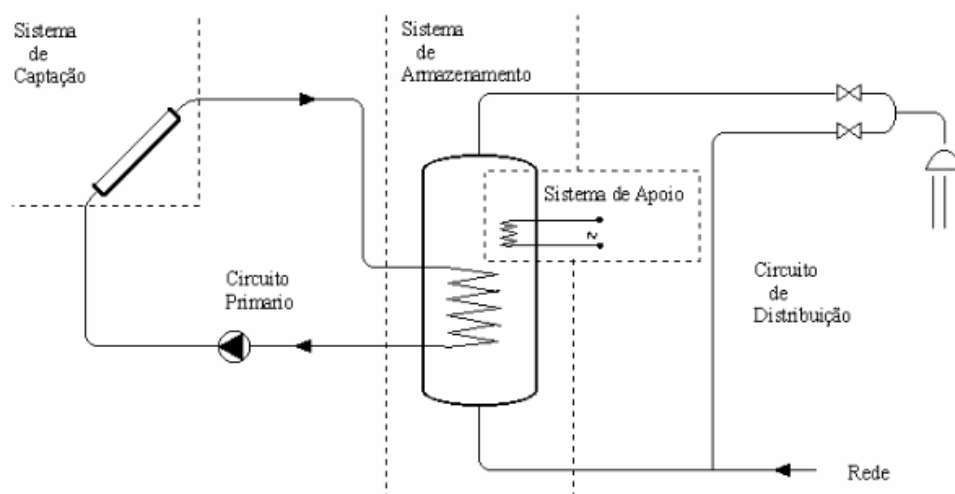


Figura 2.1 – Esquema de um Sistema Solar para produção de AQS (Baseado em Carvalho, 1998).

O princípio de funcionamento de um sistema solar térmico pode ser resumido pelas seguintes etapas (Carvalho, 1998):

- i. Os coletores solares captam a radiação solar incidente e transferem parte dessa energia (descontando as perdas) sob a forma térmica para um fluido;
- ii. O fluido transfere a energia captada nos coletores para o depósito de armazenamento (através de um ou mais permutadores);
- iii. Do depósito parte água quente cuja energia é dirigida por um circuito de distribuição para o consumo, seja de forma direta ou indireta (através de um permutador);

Quase sempre existe um sistema de apoio para fornecer a energia eventualmente em falta. Os sistemas de apoio mais comuns são a gás (esquentadores ou caldeiras) e a eletricidade (termoacumuladores elétricos).

## 2.2 Componentes do Sistema Solar Térmico

### 2.2.1 Sistema de captação – Coletor

Os coletores solares planos, são historicamente os mais utilizados para a produção de AQS, por apresentarem a melhor relação custo-desempenho e serem construtivamente simples.

A Fig. 2.2, mostra um corte de um coletor solar plano com os seus principais elementos.

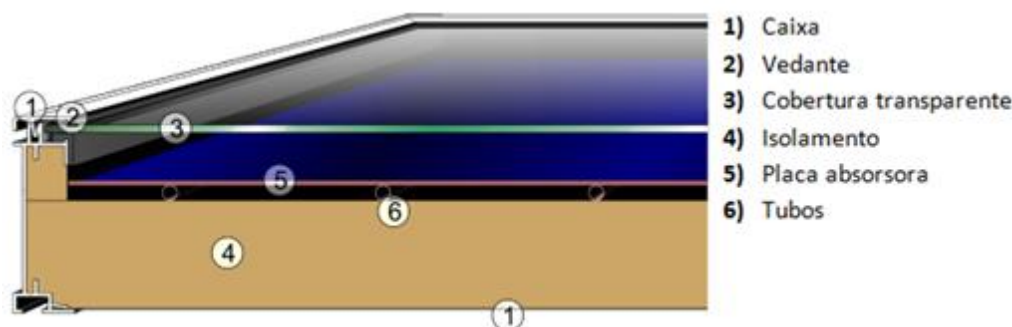


Figura 2.2 - Esquema de um coletor plano (Fonte: [www.solarpraxis.com](http://www.solarpraxis.com))

A cobertura transparente tem como funções principais provocar o efeito de estufa e reduzir as perdas térmicas por convecção. A caixa isolada evita as perdas térmicas por condução. A placa absorvedora capta a energia solar (sob forma radiativa) e transforma-a em calor transmitindo-o ao fluido térmico. À placa absorvedora, é soldada uma serpentina de tubos nas quais circula esse fluido (Lebeña e Costa, 2006).

Existem numerosas variações desta estrutura típica de coletor plano, bem como coletores com concentração ótica, evacuados ou não. Os vários tipos de coletores solares são apropriados a aplicações que vão desde o aquecimento de águas sanitárias domésticas até instalações industriais para pré-aquecimento de águas de processo, passando pelas aplicações agrícolas. É possível classificá-los em quatro grandes grupos:

- i. Coletores solares planos sem revestimento seletivo;
- ii. Coletores solares planos com revestimento seletivo;
- iii. Coletores solares planos com tubos de vácuo;
- iv. Coletores solares concentradores do tipo CPC;

Pode ainda referir-se um quinto grupo, o dos coletores sem cobertura destinado ao aquecimento de água de piscinas.

Não faz parte do âmbito deste trabalho, explicar detalhadamente o funcionamento a nível físico dos coletores uma vez que não é relevante para a implementação do sistema pericial.

O desempenho térmico dos coletores é fulcral no dimensionamento de um sistema solar térmico. É frequente que os coletores concentradores evacuados tenham um desempenho melhor que os coletores planos, e mesmo dentro da classe de coletores planos existem alguns

com desempenho superior, por exemplo aqueles com boa pintura seletiva que reduz as perdas radiativas, i.e. as emissões no infravermelho.

As propriedades óticas de cada coletor, afetam de forma diferente as diversas componentes da radiação, e por conseguinte, a absorção de energia a partir da radiação global (em  $\text{W/m}^2$ ),  $G$ , que atinge a área de abertura do coletor,  $A_a$  (expressa em  $\text{m}^2$ ) (Horta et al, 2008).

Um efeito importante é o da variação da energia absorvida com o ângulo de incidência, pelo que se usa uma função modificadora do ângulo de incidência,  $K(\theta)$ , nas equações de eficiência de coletores. Na aproximação de McIntire (1982), expressa-se como o produto de duas funções parciais para direções perpendiculares:

$$K(\theta) \equiv K(\theta_l, \theta_t) \approx K(\theta_l, 0)K(0, \theta_t) \quad (2.1)$$

Onde  $\theta$ , é o ângulo de incidência,  $\theta_l$  o ângulo de incidência na direção longitudinal (variação em altura angular) e  $\theta_t$  o ângulo de incidência na direção transversal (variação em azimuth). Num coletor plano admite-se quase sempre que o efeito do ângulo de incidência é isotrópico, i.e. igual para qualquer  $\theta$ .

A caracterização térmica de um coletor pode obter-se por meio de ensaio deste em laboratório. No âmbito de ensaios de Qualidade, para além da caracterização térmica, o coletor deverá ser sujeito a ensaios mecânicos, penetração de chuva, estagnação, etc. Em Portugal, o Laboratório de Energia Solar do LNEG realiza este tipo de ensaios segundo as regras da Certificação do Produto Coletor Solar (que seguem as Normas Europeias de Ensaio de Coletores Solares), sendo que a certificação de Qualidade em si é atribuída por uma outra entidade qualificada para isso, que no caso de Portugal é a CERTIF.

Os testes padrão mais utilizados de desempenho térmico, em condições estacionárias, para coletores solares térmicos com cobertura, seguem as normas ASHRAE 93, ISO 9806-1 ou EN 12975-2 (Rojas et al, 2008). Nesta última pode caracterizar-se o rendimento de coletores com cobertura segundo um método de ensaio dito “estacionário” ou outro dito “quase-dinâmico”. A grande maioria dos coletores no mercado é ensaiada segundo o método estacionário (Norma EN 12975-2, secção 6.1), portanto são esses os parâmetros de caracterização e algoritmos utilizados no Solterm.

Nesse contexto o rendimento instantâneo dos coletores,  $\eta(\theta)$ , pode ser calculado para cada  $\theta$ , da seguinte forma:

$$\eta(\theta) = \frac{\dot{Q}}{A_a G} \quad (2.2)$$

Onde  $\dot{Q}$  é a potência útil fornecida pelo coletor (na sua saída), expresso em W, e tem uma forma quadrática,

$$\eta(\theta) = \eta_0 K(\theta) - a_1 \frac{(T_f - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_f - T_a)^2}{G} \quad (2.3)$$

Onde  $\eta_0$  é eficiência óptica, e a temperatura média do fluido,  $T_f$ , é a média entre a temperatura à entrada do coletor,  $T_e$ , e à saída,  $T_s$ . Na eq. (2.3) entra ainda a temperatura ambiente,  $T_a$ , e dois coeficientes de perdas térmicas,  $a_1$  (em W/m<sup>2</sup>K) e  $a_2$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>).

A radiação  $G$  é função do ângulo de incidência e da inclinação,  $\beta$ , do coletor, e escreve-se à custa das suas três componentes, respetivamente direta  $I$ , difusa celeste  $D$  e difusa refletida pelo solo,  $R$

$$G(\theta) = I \cos\theta + D \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + R \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad (2.4)$$

Onde

$$R = \rho_g G \quad (2.5)$$

E  $\rho_g$  é o albedo do solo.

No caso de coletores planos a radiação que atinge o absorvedor é praticamente a radiação  $G$ , mas no caso de óticas complexas, sensíveis à direção da radiação, há que fazer uma correção na eq. 2.3. que Horta et al. (2008) propuseram cuja aproximação é usada no Solterm. Trata-se de uma correção por um fator multiplicativo designado por  $f_c$

$$f_c = \frac{1}{1 - f(1 - K_{dif,h})} \quad (2.6)$$

Onde

$$f = \frac{D}{G_{col,ref}} \quad (2.7)$$

é a fração de radiação difusa de referência prevalecente durante o teste do coletor,  $K_{dif,h}$  é a função modificadora do ângulo de incidência para a média ponderada da radiação difusa hemisférica e  $G_{col,ref}$  é a radiação global incidente no absorvedor sob condições de referência (em W/m<sup>2</sup>) (cf. expressões em Horta et al, 2008).

Assim aos dados de caracterização do coletor considerados pelo Solterm também se junta a fração de radiação difusa de referência prevalecente durante o teste do coletor.

Para além das propriedades óticas dos coletores, o projetista deve considerar o tipo de aplicação que pretende, e uma das maneiras de o fazer objetivamente é considerar a

temperatura pretendida no consumo,  $T_L$ . Um sistema pericial poderá ter a valência de aconselhar o projetista na seleção do coletor, segundo este critério.

### 2.2.2 Armazenamento

O armazenamento da energia captada permite fazer face ao carácter descontínuo da energia solar e do consumo. A acumulação de água quente é feita num depósito apropriado.

Para garantir um bom comportamento térmico do sistema solar, o armazenamento deverá verificar duas condições essenciais:

- i. Perdas térmicas baixas;
- ii. Elevada estratificação.

Para avaliar as perdas térmicas de um depósito é preciso determinar o seu coeficiente global de perdas,  $U'_{dep}$ , expresso em  $W/m^2K$ , isto é, a potência perdida por unidade de diferença de temperatura entre a água contida no depósito e a temperatura ambiente e por unidade de área exterior do depósito. O valor de  $U'_{dep}$ , é função do tipo de isolamento e da espessura, e tipicamente deverá ser tal que garanta que seja inferior a  $1 W/m^2K$  (Carvalho, 1998).

Por exemplo no atual SCE, a tabela I.09 da Portaria n.º 349-B/2013 estabelece as espessuras mínimas de isolamento para depósitos AQS.

**Tabela 2.1 – Reprodução da TABELA I.09 da Portaria n.º 349-B/2013 do SCE, Espessuras mínimas de isolamentos para equipamentos e depósitos.**

	Equipamentos <sup>(1)</sup> e depósitos de acumulação ou de inércia dos sistemas de climatização e AQS	
	Superfície $\leq 2 m^2$	Superfície $> 2 m^2$
Espessura (mm)	50	80

(1) Para unidades de tratamento de ar e termoventiladores com baterias de aquecimento/arrefecimento, a espessura mínima de isolamento deve ser de 50mm, podendo ter espessura mínima de isolamento de 25mm para caudais inferiores a 1500 m<sup>3</sup>/h se a sua instalação for em espaço interior coberto e não fortemente ventilado.

A estratificação de temperatura da água contida no depósito permite que (Carvalho, 1998):

- A temperatura da água na entrada dos coletores seja mais baixa (aumento do rendimento do coletor);
- Numa aplicação em que o consumo é distribuído ao longo do dia a temperatura da água fornecida seja mais elevada;
- Durante o consumo não se observe mistura entre a água da rede introduzida no depósito e a água quente armazenada.

### 2.2.3 Circuito primário

A transferência de energia sob forma de calor, através do fluido, dos coletores para o(s) depósito(s) de armazenamento pode-se efetuar de duas formas (Carvalho, 1998):

- Por circulação natural ou termossifão;
- Por circulação forçada



As Fig. 2.3 e 2.4, mostram respetivamente, esquemas representativos de sistemas solares térmicos em termossifão e em circulação forçada.

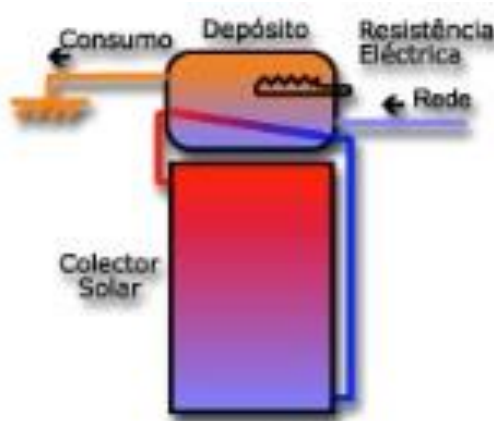


Figura 2.3 - Esquema em termossifão (Fonte: <http://www.painelsolartermico.com>)

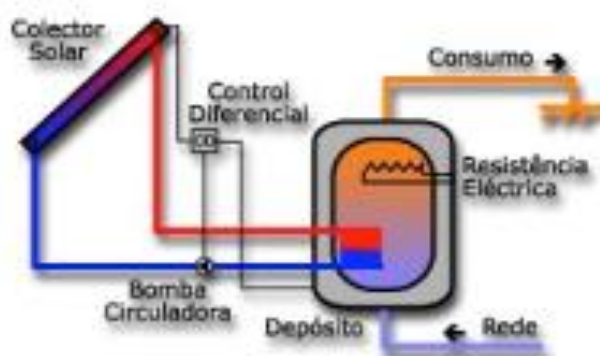


Figura 2.4 - Esquema em circulação forçada (Fonte: <http://www.painelsolartermico.com>)

A circulação por termossifão é um sistema autorregulado, funciona por diferenças de temperatura no coletor e no depósito, não necessita por isso de bombagem com controlo eletrónico.

Num sistema com circulação forçada, a circulação do fluido é obtida recorrendo a uma bomba hidráulica instalada no circuito entre os coletores e o depósito. A bomba é acionada por um comando diferencial. Este comando reage à diferença de temperatura entre o fluido à saída dos coletores e a temperatura do fluido na parte mais baixa do depósito (Carvalho, 1998).

A transferência de calor entre o sistema de captação e o sistema de armazenamento pode realizar-se das seguintes formas direta ou indiretamente.

Na transferência direta a água da rede é aquecida diretamente no coletor. O sistema pericial desenvolvido neste trabalho, não contempla esta hipótese, porque em princípio é uma solução que não garante requisitos de qualidade da água sanitária e portanto não é na prática utilizada em Portugal.

Na transferência indireta, a utilização de um permutador permite separar a água de consumo do fluido de transferência. Este é uma mistura de água com anticongelante e anticorrosivo que circula nos coletores, e minimiza os riscos de congelamento de água nos coletores devido a baixas temperaturas no exterior, e a corrosão das condutas do sistema de captação por contacto com a água da rede e o material das condutas, entre outras vantagens (Carvalho, 1998).

No entanto, a utilização de permutador(es) leva a uma penalização de transferência de calor entre o circuito primário e o circuito secundário, uma vez que a eficácia de permutação é menor que 100%, tipicamente 70%.

Por outro lado, o fluido de transferência tem um valor de  $C_p$ , capacidade calorífica da água a pressão constante (em J/KgK), inferior ao  $C_p$  da água (para a mesma temperatura) e quanto maior for a percentagem de anticongelante mais baixo é o  $C_p$ , o que na prática faz com que seja necessária mais energia para elevar o fluido a uma determinada temperatura. Em Portugal, pelo seu clima temperado, a percentagem de anticongelante utilizado é tipicamente 25%.

#### 2.2.4 Sistema de apoio

Devido à existência de flutuações nas necessidades de AQS – por exemplo mais consumo nas últimas e primeiras horas do dia em residências – bem como na disponibilidade de energia solar ao longo do ano, a energia solar captada por vezes é insuficiente para a produção, à temperatura pretendida, da quantidade de AQS necessária. Assim torna-se indispensável a existência de um sistema de apoio que complete a energia requerida para o aquecimento de AQS. O sistema de apoio deverá inclusive ter capacidade suficiente para, em caso do sistema solar não estar a funcionar por avaria ou manutenção, produzir a quantidade total de AQS requerida (Carvalho, 1998).

Na seleção do tipo de apoio e do seu modo de funcionamento deve ter-se em atenção a influência que este pode ter sobre o modo de funcionamento do sistema solar. Um apoio mal concebido ou mal controlado pode eliminar completamente a poupança de energia esperada pela utilização de um sistema solar.

O apoio pode fornecer energia diretamente ao depósito solar ou a um depósito distinto que se encontra em série ou em paralelo com o depósito solar, no circuito secundário.

Diz-se que na conceção do sistema solar e apoio convencional utilizado deverá ser dada “prioridade ao Sol”, i.e., a produção de AQS, deve ser feita em primeiro lugar pela energia proveniente da radiação solar e só depois, se não forem supridas as necessidades de consumo, ser assegurada pelo sistema de apoio (Carvalho, 1998). A melhor forma para que a “prioridade ao Sol” seja garantida, é com o tipo de ligação em série, mas esta solução é a mais complexa tecnicamente e eventualmente a mais dispendiosa.

O sistema pericial deverá considerar as diferenças a nível de desempenho energético das três configurações e consequentemente, os tipos de sistemas de apoio que melhor se adaptam às mesmas. Apesar dos aspetos económicos serem relevantes no processo de escolha do sistema

de apoio e tipo de ligação com o depósito solar, estes fatores não serão abordados numa primeira fase de conceção do sistema pericial, ou seja, neste trabalho.

No SCE prevêem-se as eficiências mínimas de sistemas de apoio convencionais, de acordo com a Tabela 06 do Despacho n.º 15793-E/2013, ver Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Valores base de eficiência para equipamentos convencionais de climatização e de produção AQS em edifícios existentes. Despacho n.º 15793-E/2013, Tabela 06**

Tabela 06 - Valores base de eficiência para equipamentos convencionais de climatização e de produção de AQS em edifícios existentes

Tipo de sistema	Eficiência	Idade do sistema	Fator
Resistência elétrica para aquecimento ambiente.	1,00	-	-
Termoacumulador elétrico para aquecimento ambiente e/ou preparação de AQS.	0,90	Entre 1 e 10 Anos	0,95
		> 10 anos	0,90
		> 20 anos	0,80
Esquentador ou caldeira a combustível gasoso ou líquido para aquecimento ambiente e/ou preparação de AQS.	0,75	Depois de 1995	0,95
		Até 1995	0,80

Tipo de sistema	Eficiência	Idade do sistema	Fator
Caldeira combustível sólido, recuperadores de calor ou salamandras para aquecimento ambiente e/ou preparação de AQS.	0,75	Entre 1 e 10 Anos	0,95
		> 10 anos	0,90
		> 20 anos	0,80
Sistemas de ar condicionado para arrefecimento ambiente, aquecimento ambiente ou bombas de calor para preparação de AQS.	2,50	Entre 1 e 10 Anos	0,95
		> 10 anos	0,90
		> 20 anos	0,80

3 – No caso de edifícios existentes nos quais não se encontrem instalados sistemas técnicos para aquecimento ambiente, arrefecimento ambiente ou preparação de AQS, devem ser consideradas as soluções por defeito aplicáveis e indicadas na Tabela I.03 da Portaria n.º 349-B/2013, de 29 de novembro, para os diferentes tipos de sistema.

### 2.2.5 Outros componentes

Para além dos quatro componentes básicos, já abordados, são necessários grupos de circulação, permutadores, equipamentos de proteção e segurança, tais como vasos de expansão e válvulas de segurança, defletores, além das tubagens, isolamentos e diversos acessórios de instalação, tais como válvulas de corte, purgadores, entre outros (Santos, A., 2012). Naturalmente que os sistemas solares térmicos necessitam de dimensionamento hidráulico, etc. porém só se abordarão os aspetos relacionados com o dimensionamento térmico, que é o objetivo do *software*.

## **2.3 Procedimentos essenciais num dimensionamento**

O dimensionamento energético de um sistema solar térmico deverá seguir alguns passos essenciais. São estes os procedimentos principais a seguir:

- i. Estimar as necessidades de aquecimento de água AQS totais (por exemplo no caso do SCE há valores objetivos que dependem da tipologia da residência);
- ii. Estimar um perfil de consumo, ou seja, o volume de água quente a consumir ao longo do dia;
- iii. Conhecer as condições locais do entorno do lugar onde o sistema vai ser instalado, com destaque para dados meteorológicos do recurso solar disponível e temperatura ambiente, mas também outras condições como sombreamentos e área disponível para instalação de coletores e outros componentes;
- iv. Escolher a configuração geral do sistema solar (“layout”), o que inclui o subsistema de apoio e o circuito de distribuição;
- v. Selecionar o modelo de coletor;
- vi. Especificar a orientação dos coletores (inclinação e azimuth);
- vii. Estimar a área de coletores a instalar;
- viii. Estimar o volume(s) do(s) depósito(s) e selecionar os respetivos modelos;
- ix. Certos regulamentos devem ser respeitados, como diâmetros de tubagens, espessuras de isolamento, eficiências mínimas de equipamentos do sistema, etc.;
- x. Estimar a produção de AQS, de origem solar; no caso do SCE existe um mínimo que deverá ser estimado com coletores padrão (ver mais à frente);
- xi. Voltar a iterar a partir de vii, ou mesmo de iv caso seja necessário, até otimizar o dimensionamento energético;

Com base nos resultados energéticos obtidos, realiza-se a análise económico-financeira, de forma a se selecionar a solução mais adequada ao projeto (relembra-se, que este trabalho não incidirá sobre a análise económica), o que envolve tipicamente a análise de várias soluções para a área de coletores e portanto reiteraões do ciclo de dimensionamento a partir do ponto vii.

## **2.4 Dificuldades práticas**

Pretende-se que o aproveitamento do recurso solar, para produção AQS, seja priorizado, o máximo possível, em detrimento da utilização de energia “convencional”, i.e. proveniente de fontes fósseis, até ser atingido um ótimo económico. No entanto, o projetista enfrenta numerosas dificuldades práticas na fase de dimensionamento, resultado de constrangimentos que não podem ser contornados ou previstos com precisão adequada.

Por exemplo, os equipamentos necessários para o sistema solar térmico (como coletores e depósitos), costumam ser adquiridos em conjunto, associados a uma marca comercial o que retira alguma liberdade de escolha ao projetista, impedindo-o de otimizar o sistema, componente a componente.

O local de montagem do sistema, também poderá ter limitações. A área disponível à instalação, poderá ser reduzida face ao que seria aconselhável. A orientação ideal (em termos de aproveitamento solar) do campo de coletores pode não ser possível. É possível ainda que o edifício acarrete problemas de logística, não sendo possível a montagem do (s) depósito (s) de armazenamento na posição e/ou no volume, à partida, mais indicados.

Os aspetos económicos, são restritivos no que toca à seleção dos melhores equipamentos em termos energéticos, como é o caso do tipo de coletores que são escolhidos de acordo com o seu custo-benefício, (i.e. preço de venda do modelo vs. valor da produção obtida com esse modelo) e não apenas pela sua produtividade (i.e. produção solar do sistema por unidade de área). A configuração do sistema solar térmico, também poderá estar dependente destes aspetos. A montagem do sistema de apoio em série com o depósito de acumulação é energeticamente vantajosa em relação à sua incorporação no próprio depósito, mas quase sem exceção, mais cara.

Todos estes fatores, apesar de limitativos são considerados no projeto do sistema solar. Outros há, que escapam parcialmente ao controlo do projetista. O volume, temperatura e perfil de consumo de água quente são estimados inicialmente mas a sua variabilidade em relação ao esperado pode ser grande. Podem ocorrer avarias no equipamento, montagem incorreta do sistema (como distância entre coletores e entre estes e os acumuladores, localização de sondas de temperatura, entre outros), falta de manutenção adequada, sombreamentos.

Os próprios dados climáticos utilizados podem não ser bem representativos do local da instalação. Isto pode suceder por várias razões. Desde logo, existem variações naturais do clima ao longo do tempo. Por exemplo, no caso do SCE (e Solterm), temos que o projetista dispõe de um Ano Meteorológico de Referência, o que é insuficiente para capturar a variabilidade interanual durante o tempo de vida do sistema solar (na ordem das décadas). Existem ainda efeitos microclimáticos, i.e. em geral os dados correspondem a uma certa zona (região NUTS III no caso do Solterm 6) e não ao local específico da instalação.

E finalmente, deve-se referir a estimativa do desempenho do sistema, implementada quase sempre em *software*, é feita segundo algoritmos que são uma descrição melhor ou pior do funcionamento real – tendo num extremo a utilização de parametrizações empíricas à base de valores mensais e noutro a simulação dinâmica do sistema com base em modelos físicos muito detalhados de cada componente. Desta forma existe uma certa incerteza associada ao próprio modelo do sistema/ao *software* utilizado.

Servem estes exemplos, para mostrar que é inútil exagerar na “perfeição” da otimização energética de um sistema solar. O sistema pericial não pode dar indicações rígidas, nem ignorar que há constrangimentos próprios que muitas vezes são “feito” e não “defeito” do dimensionamento que o projetista faz. Poderão ser identificados problemas graves do dimensionamento, mas com vista a melhorar o desempenho do sistema solar térmico e maximizar a fração solar (detalhada à frente), apenas podem ser dados conselhos, e caberá ao projetista decidir se os quer, ou pode, seguir.

### **3 Conceito de Sistema Pericial**

#### **3.1 Definição geral**

O Sistema pericial é um sistema informático que utiliza o conhecimento na resolução de problemas normalmente resolvidos por humanos. É um programa de computador que representa e raciocina com o conhecimento de algum (uns) perito (s) no assunto, visando a solução de problemas ou aconselhamento (Jackson, 1999).

Existem vários tipos de sistema pericial e diferentes definições de autor para autor, no entanto em termos gerais pode-se afirmar que:

- É um programa de computador que procura simular o comportamento de um ou mais peritos humanos e o seu processo de decisão;
- Resolve problemas numa área de conhecimento específica;
- Pode aconselhar ou apresentar alternativas, perante um problema, não tirando a liberdade ao utilizador na tomada de decisão;
- Tem a faculdade de explicar o processo de tomada de decisão com o conhecimento especializado que possui;

Pode substituir completamente uma função que normalmente requer um especialista humano, ou simplesmente ser assistente no processo.

#### **3.2 Vantagens e limitações**

Na literatura especializada, as vantagens identificadas dos sistemas periciais são diversas, embora se possa mencionar algumas (Turban and Aronson, 2000):

- Os sistemas periciais podem trabalhar mais rápido que os humanos, logo aumentam a produtividade;
- Diminui o tempo de tomada de decisão dos humanos, a partir de recomendações;
- Disponibiliza informação útil de forma mais eficiente;
- A perícia está retida no sistema e pode ser usufruída de forma intemporal e por vários utilizadores;
- Pode ser flexível no processo de tomada de decisão, apresentando várias soluções possíveis;
- Pode integrar o conhecimento de vários peritos.

De forma também abrangente, baseado nos mesmos autores, identificam-se como principais problemas e limitações, na conceção e funcionamento de sistemas periciais:

- Trabalham apenas num domínio limitado;
- A transferência de conhecimento depende da perceção do utilizador, o que pode levar a erros de análise;
- Podem não conseguir chegar a conclusões;
- Podem estar construídos sob pressupostos mutáveis no tempo, como regulamentos ou indicadores financeiros;

- Os peritos podem não ter meios independentes de validar as suas conclusões.

### 3.3 Componentes do sistema pericial

Um sistema pericial é constituído basicamente por conhecimento adicionado de procedimentos de inferência (Alves, 2005). Genericamente, os componentes de um sistema pericial são os seguintes (Alves, 2005):

- Base de Conhecimento, local onde reside o conhecimento do domínio visado pelo Sistema Pericial. Armazena o conhecimento necessário à tomada de decisão;
- Motor de Inferência, responsável pelo controlo do sistema e tomada de decisão;
- Usa o conhecimento da base de conhecimento para resolver o problema específico com os dados contidos na base de factos;
- Interface, contém os ecrãs do sistema desenvolvidos para interagir com os utilizadores. A interface do utilizador inclui duas componentes, a componente de aquisição de conhecimento e a componente de explicação. A componente de aquisição de conhecimento é utilizada pelo perito quando está a incluir no sistema o conhecimento necessário para que este tome as decisões corretas. A componente de explicação interage com o utilizador;
- Memória de trabalho, armazena dados, informação ou conhecimento específicos do problema em análise com vista a auxiliar no funcionamento dos outros módulos;
- Explicações, onde se constroem as razões porque uma dada conclusão foi ou não obtida, ou, ainda, porque se está a efetuar determinada pergunta. Componente que explica o modo como as soluções foram obtidas e justifica os passos efetuados;

Nas Fig. 3.1 e 3.2 podem-se observar, respetivamente, a representação esquemática dos componentes de um sistema pericial e a incorporação de sistemas periciais dentro de outras tecnologias/sistemas, como é o caso daquele que se pretende implementar, uma vez que se pretende que faça parte do programa de *software* Solterm, como ferramenta.

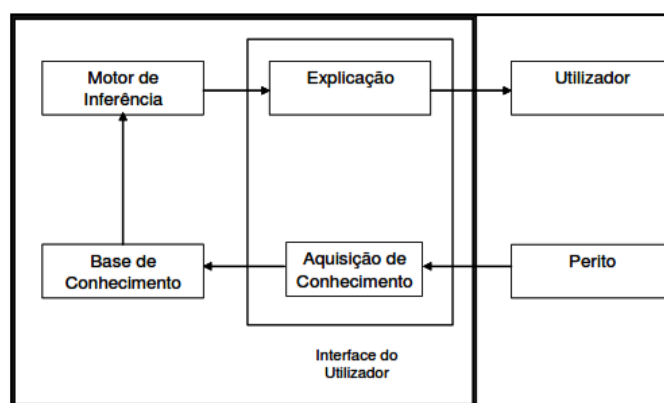


Figura 3.1 - Componentes de um sistema pericial

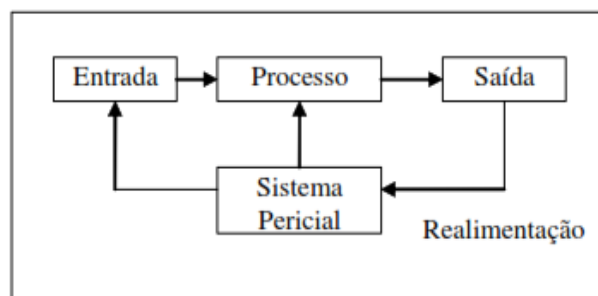


Figura 3.2 - Esquema de um sistema pericial integrado

### 3.4 Tipo de sistema pericial a implementar

Os sistemas periciais podem ser classificados sob várias perspectivas, como por exemplo pelo tipo de tarefa que executam segundo Hayes-Roth et al. (1983) referida por Jackson (1999). Porém, é comum os sistemas periciais realizarem múltiplas tarefas, assim é mais útil categorizarem-se pelo modo como o conhecimento é processado para a resolução de problemas. A chamada “Representação do Conhecimento”, pode ser baseada (apenas alguns exemplos) em:

- Regras – Sistemas de produção para codificar regras de condição/ação (Alberto, 2013);
- Casos – Utiliza uma base de dados com soluções de problemas para resolver novas situações (Alberto, 2013);
- Modelos – A análise é fundamentada diretamente na especificação e funcionalidade do sistema físico (Santos, 1998);
- Fluxogramas de decisão – Conceitos são organizados em forma de árvores (Alberto, 2013);
- Sistemas híbridos – Qualquer combinação de esquemas de representação do conhecimento (Alberto, 2013).

O tipo de sistema pericial a implementar, será um sistema híbrido que está dividido pelas suas etapas fundamentais. A Representação do Conhecimento, será baseada em regras, no momento de pré-simulação energética, como é o caso da aplicação dos regulamentos e/ou boas práticas no dimensionamento. O *software* Solterm, impedirá o utilizador de efetuar a simulação se introduzir, por exemplo, espessuras nas tubagens que não cumpram os regulamentos, ou seja é um processo simples de ação/reação.

No pós-simulação, se o desempenho energético for insatisfatório, haverá um aconselhamento ao utilizador a alterar o seu dimensionamento, detetando o que poderá estar a afetar o desempenho do sistema solar térmico. A Representação do Conhecimento, nesta fase, poderá ser baseada em regras, casos ou mesmo em fluxogramas de decisão.



## 4 *Software* de dimensionamento Solterm 6

### 4.1 Conceitos e generalidades

Originalmente, e até à versão 3, o Solterm destinava-se ao pré-dimensionamento energético de grandes sistemas de energia solar térmica para fins industriais, com base em valores médios mensais ou da assim chamada função “utilizabilidade<sup>1</sup>”, a energia disponível na radiação solar acima de um certo limiar de arranque de funcionamento dos coletores solares.

Na sua versão 4, o Solterm foi adaptado a sistemas de menor dimensão, para residências, piscinas, etc., e aplicado como padrão de cálculo para vários sistemas governamentais de incentivo à utilização da energia solar térmica. Neste caso já se baseava parcialmente em simulação quase-dinâmica, em passo de tempo horário, com base em Anos Meteorológicos de Referência.

A versão 5 incluía já sistemas solares fotovoltaicos, e análise de desempenho – i.e. das séries temporais do recurso solar, necessidades de consumo e funcionamento do sistema, e não apenas pré-dimensionamento. Baseava-se em simulação quase-dinâmica, com passo de tempo de 6 minutos. Faz ainda análise económica e de emissões de gases com efeito de estufa evitadas.

Esta versão 5 serviu de novo como padrão de cálculo para dois sistemas governamentais de incentivo à utilização da energia solar térmica, e principalmente para padrão de cálculo da contribuição de energia solar térmica (eventualmente a substituir por outros sistemas utilizando fontes de energia renováveis) no balanço energético de edifícios, no âmbito do Sistema Nacional de Certificação de Edifícios (SCE) na sua versão de 2006 (Decs.-Lei 78, 79 e 80/2006). Neste momento a versão em vigor é a 5.1.4, disponibilizada por encomenda através do *website* do LNEG.

Logo pouco tempo após o lançamento do SCE 2006, começou a ser preparado o seu futuro refrescamento (inicialmente previsto para 2011), através de Comissões Técnicas lideradas pela ADENE e participadas por peritos, indústria, universidades, LNEG e LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil).

Nesse sentido o LNEG ficou encarregado de lançar uma nova versão do Solterm, a versão 6, com duas vertentes: uma vertente de utilização livre para os cálculos obrigatórios no futuro SCE, e uma versão profissional para dimensionamento e análise de desempenho de sistemas de energias renováveis, incluindo não só sistemas solares térmicos mas também fotovoltaicos, geotérmicos, mini-hídrica, micro eólica e biomassa. A análise de desempenho dos sistemas solares térmicos é feita via simulação energética sob condições quase estacionárias: isto é, são simulados os balanços energéticos no sistema em intervalos curtos (5 minutos), durante

---

<sup>1</sup>Traduz a fração da energia total disponível no coletor que pode ser utilizada para uma determinada temperatura de funcionamento deste. É função da temperatura de funcionamento e das condições climáticas e, porque este método se aplica a outros tipos de coletores (concentradores, por exemplo), é função do tipo de coletor.

os quais se considera constante o estado do entorno do sistema (recurso solar, temperaturas, consumo) (Aguilar e Coelho, 2012).

O presente trabalho começou ainda com o Solterm 5 em distribuição, e entretanto foi já publicado o Sistema Nacional de Certificação de Edifícios na sua revisão de 2013 (Dec. Lei nº ....). Assim este trabalho foi desenvolvido utilizando o protótipo do Solterm 6.0.0.24, e embora o *motor* de simulação de sistemas solares térmicos não tenha mudado significativamente, teve alguns ajustamentos de pormenor até ao último protótipo utilizado, o Solterm 6.0.0.30; houve ainda mudanças no pós-processamento de resultados. Assim, inevitavelmente houve algum prejuízo para a coerência dos resultados e regras estudadas para o sistema pericial, dado que sucessivos protótipos do Solterm 6 foram utilizados durante o trabalho. No entanto, crê-se que isto não prejudicou a construção e teste das metodologias propostas para implementação do sistema pericial, embora as regras finais a implementar em futuras versões do Solterm 6 possam não ser exatamente as que aqui serão apresentadas.

## 4.2 Funcionalidades e base de dados do Solterm 6

O Solterm 6 funciona no ambiente Microsoft Excel ©, utilizando Visual Basic for Applications (VBA). A informação relevante para o dimensionamento e simulação de sistemas é armazenada nas folhas Excel, como base de dados. Cada tipo de sistema é acedido numa folha, sendo a interface de entrada como se pode observar pela Fig. 4.1.



Figura 4.1 - Layout de apresentação do Solterm - Versão 6.0.30

As folhas mais relevantes para este trabalho, referentes a dados gerais e à configuração e análise do tipo de sistemas solares térmicos para preparação AQS, serão detalhados de seguida.

### 4.2.1 Entorno

Em qualquer dimensionamento energético, começa-se por definir o local e as restrições envolventes (Fig. 4.2). Na base de dados do Solterm 6, estão incluídas todas as Zonas NUTS III

de Portugal e respetivos municípios. Nesta folha, estão contidas informações como Latitude, Longitude e Altitude média de cada zona NUTS III, que são relevantes para a orientação do (s) coletor (es) a instalar. Contudo, o local poderá ter obstáculos para a captação de energia solar. Através da caixa a azul, podem-se marcar os obstáculos do horizonte, do ponto de vista do painel solar, quer em termos de azimute como de altura solar (em graus). A resolução é de 5°. Após essa marcação, o Solterm 6 poderá aconselhar, clicando na caixa de texto “melhores orientações para receber radiação solar”, a inclinação ( $\beta$ ) e azimute ( $\alpha$ ) do coletor ou campo de coletores mais indicados para o efeito.

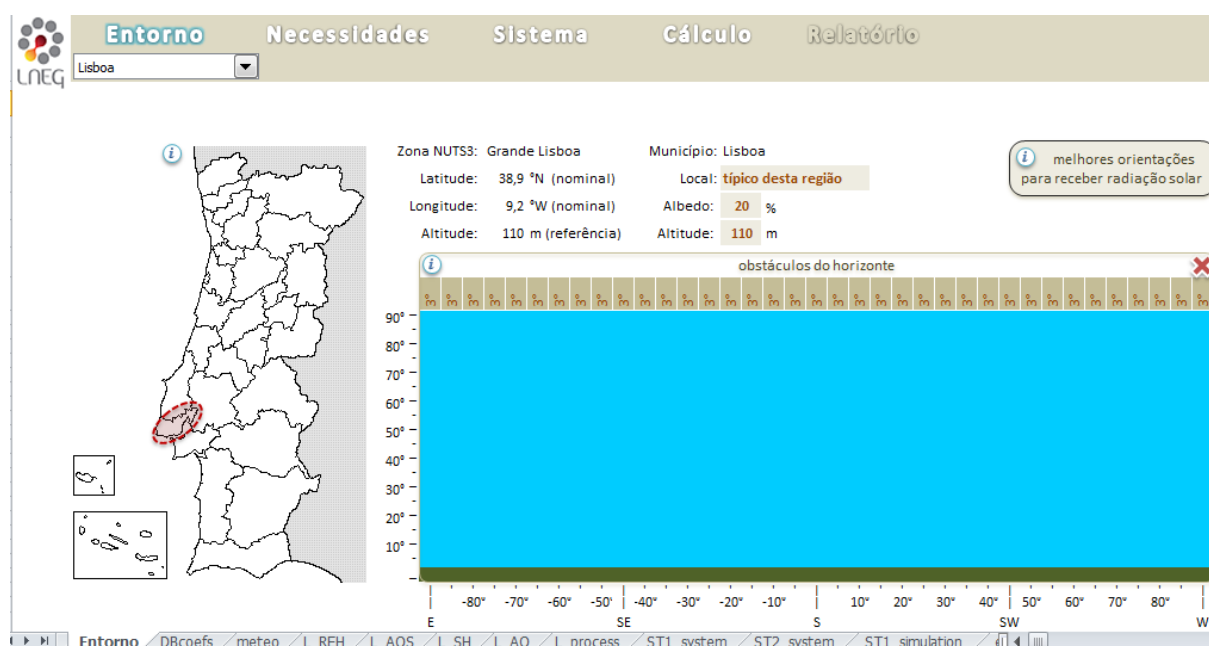


Figura 4.2 - Definição do Entorno local - Solterm 6.0.30.

#### 4.2.2 Dados meteorológicos

Na folha representada na Fig. 4.3, encontram-se os dados meteorológicos (para além dos dados geográficos, já abordados), para cada Zona NUTS III, necessários para o cálculo de desempenho energético de sistemas solares térmicos (ou PV). Especialmente importante são as séries horárias para cada NUTS III, constituindo Anos Meteorológicos de Referência, que incluem  $T_a$ ,  $G$  e a radiação difusa,  $D$ . A partir de  $G$  e  $D$ , é estimada a irradiação solar horária no plano do coletor solar. Em conjunto com  $T_a$ , que influi nas perdas térmicas, é então possível estimar a energia solar horária recolhida pelo coletor e injetada no depósito.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X									
1	Zona																																
2	NUTS_III			Minho-Lima			Alto Trás-os-Montes			Cávado			Ave			Grande Porto			Tâmega			Douro											
3	Índice			1			2			3			4			5			6			7											
4	Latitude nominal [°N]			41,892			41,62			41,6			41,5			41,3			41,2			41,1											
5	Longitude nominal [°W]			8,515			7,069			8,45			8,15			8,57			8,15			7,44											
6	Altitude nominal [m]			268			680			170			425			95			320			580											
7	Estação de aquecimento			M	GD(18)	T <sub>j</sub>																											
8	REF [meses, °C, °C]			7,2	1629	8,2	7,3	2015	5,5	6,8	1491	9,0	7,2	1653	7,8	6,2	1250	9,9	6,7	1570	7,8	6,9	1764	6,3									
9	a [mês/km, °C/m, °C/km]			1,0	1,5	-5	0,0	1,4	-4	1,0	1,3	-6,0	0,0	1,5	-6	2,0	1,6	-7	0,0	1,6	-5,0	0,0	1,4	-4									
10	Estação de arrefecimento			T <sub>jjas</sub>																													
11	REF [°C]			20,5			21,5			20,7			20,8			20,9			21,4			22,7											
12	a [°C/km]			-4			-7			-3			-3			0			-3			-6											
13	Série horária																																
14	MM	DD	HH	T[°C]	G[W/m²]	D[W/m²]	T	G	D	T	G	D	T	G	D	T	G	D	T	G	D	T	G	D									
15	1	1	1	6,4	0	0	5,8	0	0	9,7	0	0	9,6	0	0	6,4	0	0	6,8	0	0	2,8	0	0									
16	1	1	2	5,8	0	0	5,5	0	0	9,1	0	0	9,3	0	0	5,9	0	0	5,9	0	0	2,0	0	0									
17	1	1	3	5,4	0	0	5,3	0	0	8,6	0	0	8,9	0	0	5,5	0	0	5,2	0	0	1,3	0	0									
18	1	1	4	5,0	0	0	5,1	0	0	8,1	0	0	8,7	0	0	5,2	0	0	4,5	0	0	0,7	0	0									
19	1	1	5	4,7	0	0	5,0	0	0	7,8	0	0	8,5	0	0	4,9	0	0	4,1	0	0	0,3	0	0									
20	1	1	6	4,5	0	0	4,9	0	0	7,6	0	0	8,4	0	0	4,8	0	0	3,8	0	0	0,1	0	0									
21	1	1	7	4,5	0	0	4,8	0	0	7,5	0	0	8,3	0	0	4,7	0	0	3,7	0	0	0,0	0	0									
22	1	1	8	4,8	7	7	5,0	11	9	7,9	8	8	8,6	13	8	5,0	16	6	4,2	12	10	0,5	13	10									
23	1	1	9	5,8	57	57	5,5	87	66	9,0	64	64	9,2	103	58	5,8	125	39	5,8	88	69	1,9	97	66									
24	1	1	10	7,2	117	109	6,2	178	119	10,6	131	116	10,1	210	104	7,0	251	69	8,1	177	123	3,9	195	117									
25	1	1	11	8,7	167	144	7,0	253	157	12,4	187	153	11,2	298	137	8,3	356	90	10,6	251	161	6,1	277	153									
26	1	1	12	10,1	196	162	7,8	295	177	14,0	218	172	12,1	348	154	9,5	416	101	12,9	292	181	8,1	322	172									
27	1	1	13	11,0	196	162	8,2	295	177	15,1	218	172	12,8	348	154	10,3	416	101	14,5	292	181	9,4	322	172									
28	1	1	14	11,4	167	144	8,4	253	157	15,5	187	153	13,0	298	137	10,6	356	90	15,0	251	161	9,9	277	153									
29	1	1	15	11,3	117	109	8,4	178	119	15,5	131	116	13,0	210	104	10,6	251	69	14,9	177	123	9,8	195	117									
30	1	1	16	11,1	57	57	8,3	87	66	15,2	64	64	12,9	103	58	10,4	125	39	14,6	88	69	9,6	97	66									
31	x	data0	welcome	Entorno			DBCoefs			meteo			L_REH			L_AOS			L_SH			L_AO			L_process			ST1_system			ST2_system		

Figura 4.3 - Banco de dados meteorológicos do Solterm

#### 4.2.3 Necessidades AQS e perfil de consumo

A Fig.4.4, mostra a folha do Solterm 6.0.0.30 referente às necessidades AQS segundo o Regulamento de Desempenho Energético dos edifícios de Habitação (REH). Esta interface permite especificar as necessidades de AQS para residências, no contexto da Portaria n.º 349-D/2013, relativa ao SCE (DL 118/2013). O perfil de consumo diário, está padronizado e mantém-se inalterado ao longo da semana, mês ou ano e não é passível de ser alterado; o utilizador/projetista apenas introduz o número de frações por tipologia. De seguida, o número de ocupantes e as necessidades AQS, são automaticamente atribuídas.

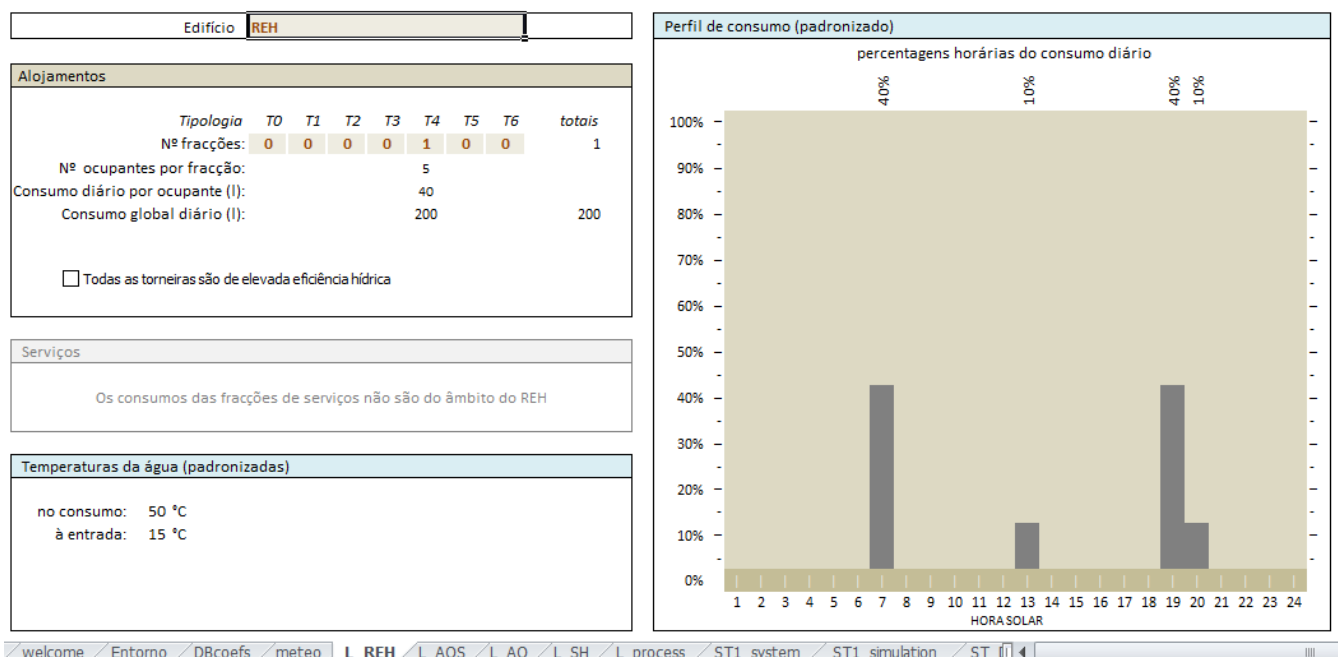


Figura 4.4 - Necessidades AQS e perfil de consumo, segundo o REH

Como se pode apreciar na Fig.4.5, existe uma folha onde o utilizador pode definir as necessidades AQS,  $T_L$ , a temperatura da água à entrada e perfil de consumo.

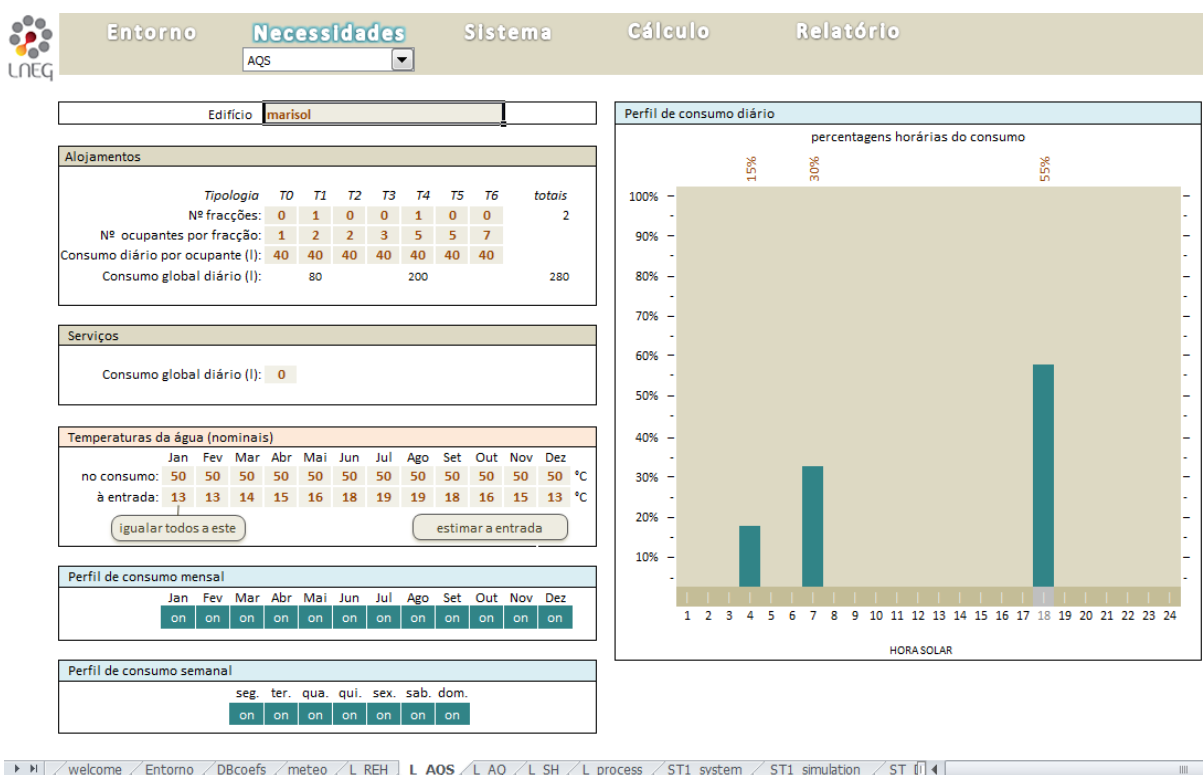


Figura 4.5 - Necessidades AQS e perfil de consumo, personalizados pelo utilizador

#### 4.2.4 Configuração do sistema solar térmico

Na secção do programa mostrada na Fig.4.6, configura-se o sistema solar térmico. Começando pela área de captação a instalar, a partir da seleção do tipo de coletor (com  $A_a$  característica) e respetiva quantidade, assim como da orientação ( $\beta$  e  $\alpha$ ) e tipo de montagem. De seguida, define-se o caudal específico no circuito primário,  $\dot{m}$  (em l/m<sup>2</sup>h), a potência de bombagem da bomba de circulação,  $P_{bomba}$  (em W), o diâmetro da tubagem,  $d_1$ , e espessura do isolamento da tubagem,  $h_1$ , referentes ao circuito primário (ambos expressos em mm). Em relação ao armazenamento, o utilizador poderá personalizar o(s) depósito(s) definindo  $U_{dep}$  (em W/K), o volume útil do depósito,  $V_{dep}$  (em l), a altura do depósito (exterior),  $h_{ext}$  (em m), o diâmetro do depósito (exterior),  $d_{ext}$  (em m), o material das paredes e tipo de operação (modo e posição), mas também a eficácia do(s) permutador(es) internos.

O utilizador poderá também optar por configurar o sistema com um único depósito, com volume de acumulação total, ou distribuir esse volume em vários acumuladores (um por fração). Relativamente ao sistema de apoio, este poderá ser montado em série, paralelo ou estar incorporado no(s) depósito(s). Com dois tipos de sistema de apoio, caldeira ou termoacumulador elétrico, é possível seleccionar vários combustíveis. Cada um, apresenta valores de FE (kgCO<sub>2</sub>e/MJ), i.e. o fator de emissão de gases com efeito de estufa, fração renovável e rendimento de acordo com o Despacho 17313/2008 MEI (MEI, 2008). Por fim, define-se o diâmetro da tubagem,  $d_2$ , e a espessura do isolamento da tubagem,  $h_2$ , referentes ao circuito secundário.

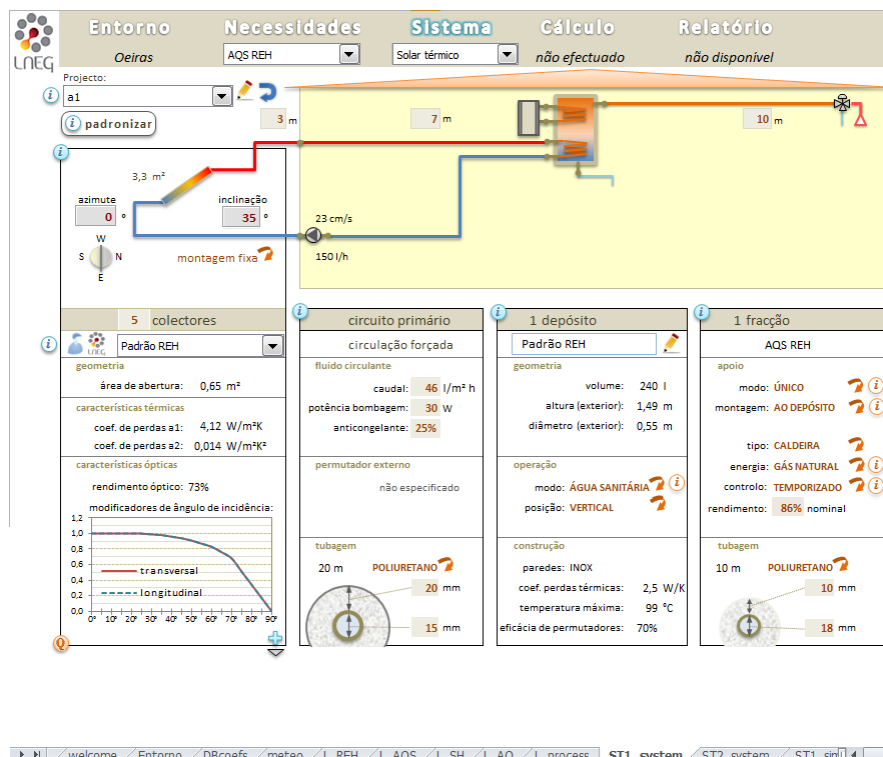


Figura 4.6 - Configuração do sistema solar térmico - Solterm 6.0.0.30

#### 4.2.5 Resultados da simulação

Depois do dimensionamento do sistema solar térmico, efetua-se a simulação energética na folha que se exemplifica na Fig.4.7.

Entre os resultados de simulação que se podem consultar nesta folha, estão a média anual da radiação solar global no plano horizontal,  $H_y$ , a média anual da radiação solar global captada,  $G_y$ , a média anual da radiação solar difusa,  $D_y$ , e a temperatura média anual,  $T_y$ . No que respeita ao desempenho energético, tem-se a energia final de origem solar fornecida pelo sistema,  $E_s$ , energia final de origem no apoio energético,  $E_a$ , ambos fornecidos pelo sistema e energia final perdida no circuito primário, secundário e de distribuição,  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  respetivamente. Podem-se visualizar estes parâmetros em gráficos de valores mensais (apenas estes estão visíveis na Fig.4.7), diários ou mesmo horários.

Contudo, será principalmente avaliando quatro índices energéticos relativos ao rendimento, produtividade, fração solar e perdas térmicas (e que serão detalhados mais à frente), que o projetista poderá eventualmente corrigir o dimensionamento do sistema, simulá-lo de novo e assim por diante num ciclo (ou vários) de otimização.

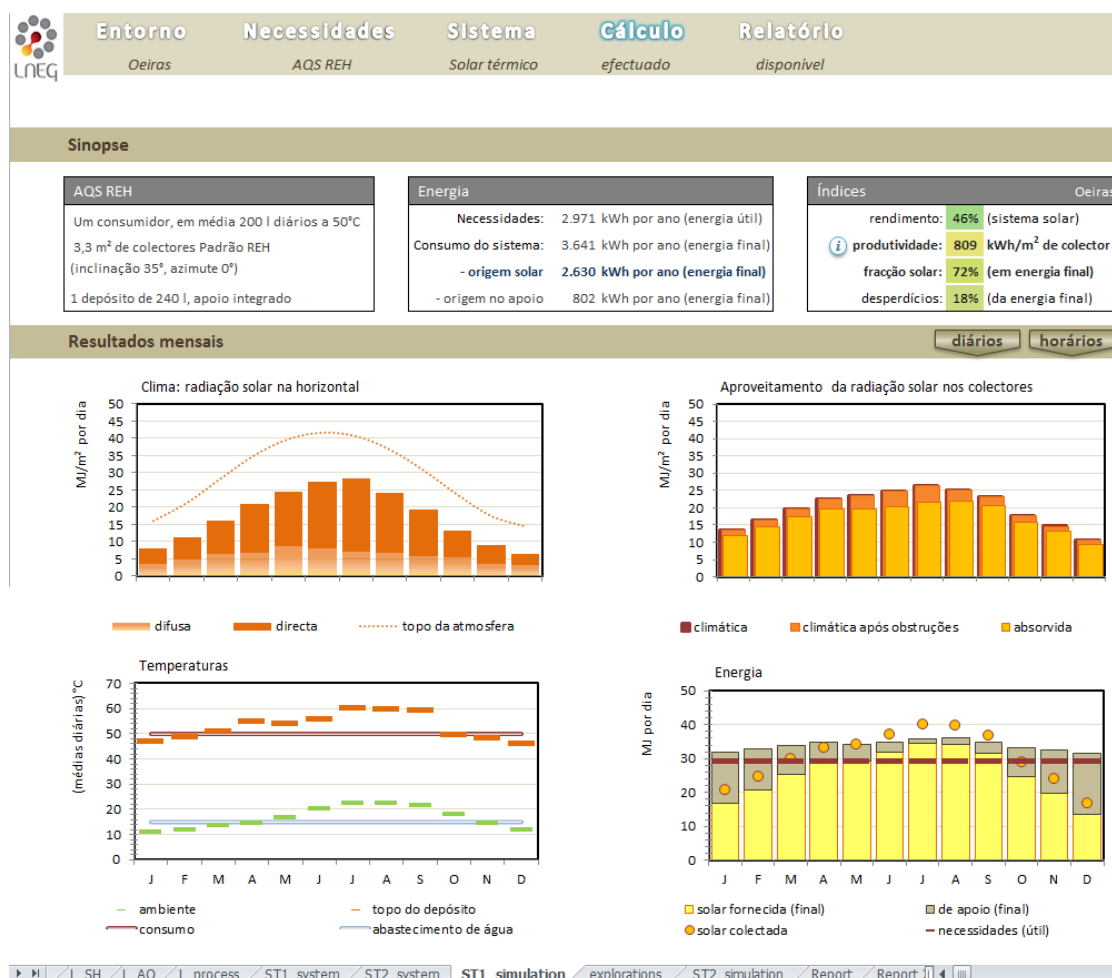


Figura 4.7 - Resultados da simulação energética - Solterm 6.0.0.30

#### 4.2.6 Outras secções

No Solterm 6 existem ainda umas folhas com as bases de dados de coletores solares do LNEG (não editável e só com coletores certificados) e do utilizador (editável). São armazenadas as características dos coletores, designadamente  $A_a$ ,  $\eta_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $\theta_l$ ,  $\theta_t$  (com intervalos de 5°), assim como a Entidade Certificadora e a referência do respetivo certificado.

Também se podem dimensionar e simular outros tipos de sistemas solares térmicos, como kits solares (circulação natural com termossifão), sistemas para fins industriais ( $T_L$  elevado) ou de climatização, para além dos outros sistemas de energias renováveis já referidos.

Algumas secções que farão parte deste *software*, não foram ainda desenvolvidas até à data deste trabalho, tais como a análise ambiental e económica.

Por fim, realça-se que as folhas de resultados das simulações podem ser exportadas em formato PDF ou imprimidas, com todos os valores e índices de desempenho relevantes para a análise e dimensionamento energético - pode ser consultado um exemplo na Fig. A.1 referente aos Anexos.

### 4.3 Algoritmos principais do Solterm 6

Descrevem-se agora brevemente os principais algoritmos que o Solterm 6 usa para simulação de sistemas solares térmicos.

Uma primeira tarefa preparatória da simulação é detetar se a radiação solar sofre obstruções antes chegar ao coletor solar. O *software* examina, para a hora solar relevante, se o disco solar está a ser ocultado, calculando a sua elevação angular e comparando com a máscara de obstruções introduzida pelo projetista. Se houver obstruções, a radiação direta é anulada ( $B=0$ ). De seguida é calculada a fração do hemisfério celeste que está oculta por obstruções e a radiação difusa  $D$  é reduzida nessa proporção.

A radiação difusa refletida é estimada por  $R = \rho_g (B + D)$ , para cada hora.

Uma segunda tarefa preparatória é estimar a radiação incidente no plano inclinado do coletor solar, o que é feito através do modelo de Muneer (Muneer, 1990, 2004; Włodarczyk, Nowak, 2009). Trata-se de um modelo regressivo com múltiplos ramos, conforme as condições de insolação (e.g. cobertura nebulosa tal como inferida de  $D$  e  $I$ , em relação aos respetivos máximos para condições de céu limpo).

Conclui-se a preparação da simulação calculando um conjunto de valores de condutividade térmica que podem ser pré-processados, com destaque para as propriedades térmicas do fluido circulante (água com anticongelante), e os relativos às tubagens e ao depósito (condução de calor entre camadas de água, através das paredes e através do isolamento térmico, para o exterior).

A simulação do sistema solar em si mesma é feita utilizando balanços energéticos para cada parte do sistema solar, em curtos passos de tempo, durante os quais se possa considerar que o sistema está a funcionar em regime estacionário.



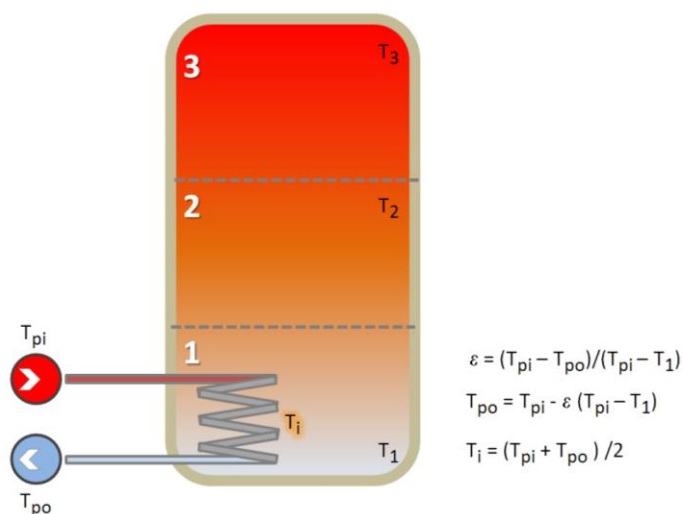
Porque a velocidade de cálculo é muito importante no contexto da utilização do *software*, esse passo de tempo é adaptativo. É estimado como o maior período (com o máximo de uma hora) em que menos de 25% da massa de água de cada camada do depósito é afetada pelo funcionamento do sistema. O depósito é simulado com três camadas de água.

Primeiro é simulada a operação do circuito primário (percurso permutador no depósito-coletores-permutador no depósito), depois o comportamento do armazenamento e finalmente o circuito secundário (percursos armazenamento - pontos de consumo).

Todas as equações de balanço térmico são discretizadas usando um esquema simples de equações de diferenças finitas de primeira ordem.

No circuito primário é seguida a água que sai do permutador colocado na base do depósito e calculada a queda de temperatura até à entrada do coletor, conhecendo o comprimento e condutividade térmica da tubagem, o caudal e propriedades térmicas do fluido. Depois são usadas as eqs. 2.2 a 2.6 e calculada a temperatura de saída do coletor. Segue-se a análise do troço coletor-permutador, calculando-se a temperatura de entrada neste.

No desempenho do armazenamento, começa por calcular-se a transferência de calor no permutador, i.e. entre fluido circulante e água armazenada, cf. Fig. 4.8.



**Figura 4.8 - Esquema conceptual da injeção de calor no depósito a partir dos coletores. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG**

A massa de água aquecida forma uma bolha que estabilizará no mesmo ou noutra nível, determinado através de equações como as de Reddy (1987), cf. p.31 e Fig. 4.8.

A este efeito de convecção, segue-se a estimativa dos efeitos de: condução de calor entre camadas (cf. Fig. 4.8); do eventual apoio energético embebido na camada superior; da extração de calor e eventualmente água (se não ocorrer através de permutador); das perdas térmicas através das paredes; e da eventual entrada de água nova na base do depósito. Isto determina uma nova distribuição de temperatura no depósito.

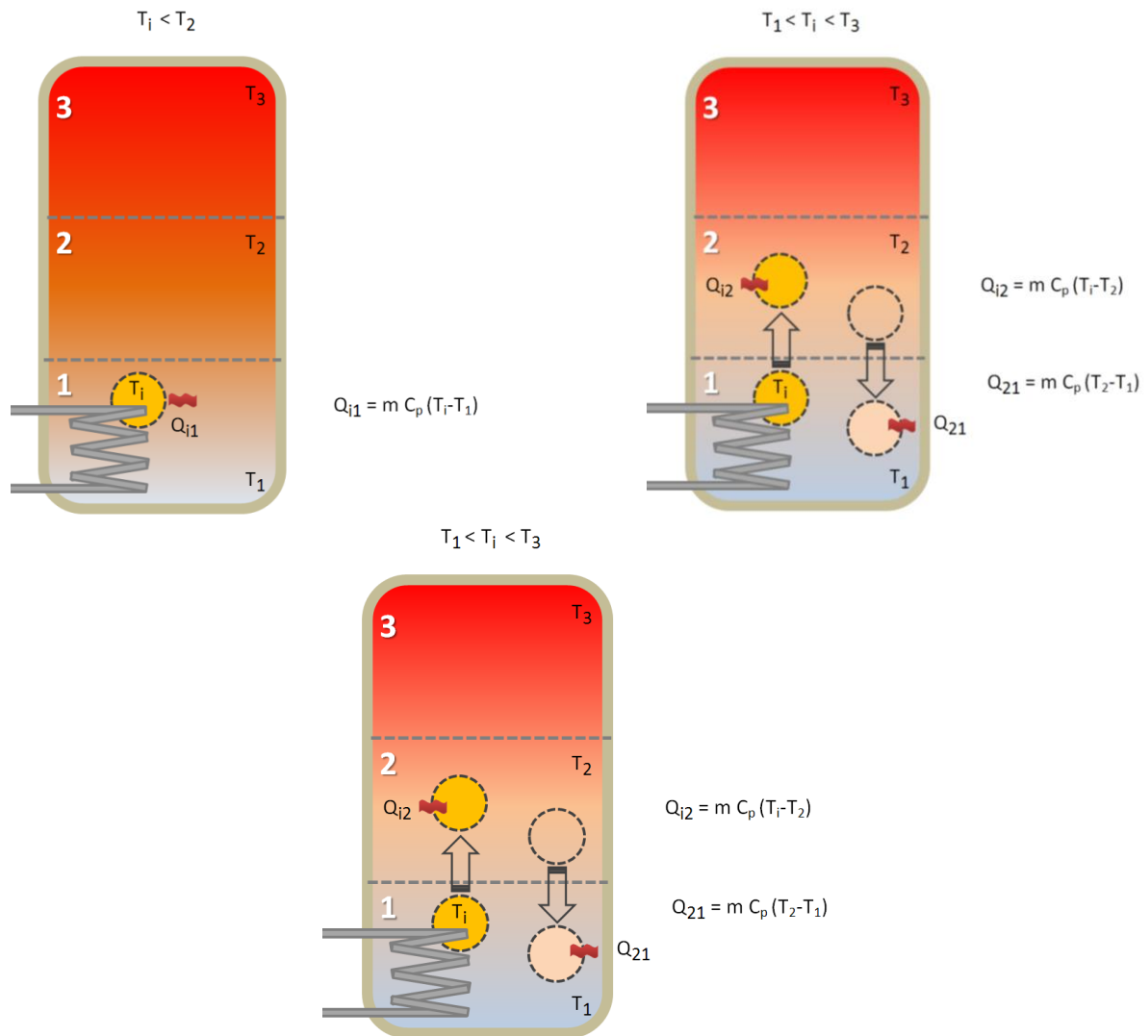


Figura 4.9 - Esquema conceitual da convecção no depósito, dependente das temperaturas das camadas e da bolha aquecida pelo permutador. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG.

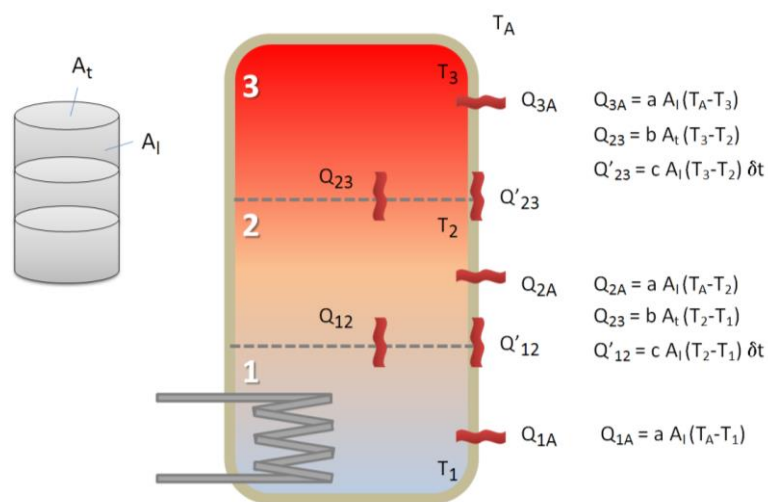


Figura 4.10 - Esquema conceitual da condução de calor no depósito. Fonte: R. Aguiar, comunicação interna LNEG.

O troço ou troços depósito-pontos de consumo é também simulado tendo em conta a temperatura-alvo no consumo, a que está disponível na água da camada superior do depósito, o efeito do eventual apoio energético (em série ou em paralelo com o armazenamento), e as perdas térmicas na tubagem. Aqui, a abordagem de alguns algoritmos é estabelecer *a priori* uma temperatura de preparação da água para percorrer as tubagens de distribuição, fazendo-se depois a mistura com água fria no ponto de consumo para obter a temperatura-alvo. No caso do Solterm 6, usa-se um esquema retroativo e iterativo para determinar qual a massa de água a extrair do depósito e quanto tem de ser aquecida (ou misturada com água mais fria) para atingir exatamente a temperatura alvo desejada no ponto de consumo.

#### 4.4 Validação do Solterm 6

Sendo o Solterm o *software* padrão indicado a utilizar no SCE, é indispensável a sua validação. Porém, não existem monitorizações detalhadas e extensas de sistemas solares que permitam fazer esta validação diretamente com dados experimentais (Costa e Aguiar, 2013b). Como alternativa, houve a necessidade de recorrer a análise de resultados por comparação com as estimativas produzidas por outro *software* que esteja validado, no caso o TRNSYS (TRNSYS, 2012) (Costa e Aguiar, 2013b).

É importante referir que as metodologias de cálculo são distintas nos dois *softwares*. Desde logo, tudo depende dos módulos de cálculo escolhidos para construir os sistemas no TRNSYS, que podem ser mais ou menos detalhados, além de poderem seguir diferentes abordagens de cálculo. Depois, enquanto no Solterm 6 as equações são quase-estacionárias, não representando efeitos de inércia térmica ou histereses; o TRNSYS utiliza equações diferenciais, permitindo assim considerar esses efeitos. Já no caso muito importante da estimativa de radiação absorvida pelos coletores, a metodologia utilizada pelo Solterm 6 é mais sofisticada que a de qualquer módulo existente no TRNSYS.

Para se comparar os resultados de ambos os *softwares*, realizaram-se estudos de análise de sensibilidade, variando algumas condições, que foram:

- i. Relação  $A/V'$  (trata-se do principal parâmetro de dimensionamento de sistemas solares térmicos), i.e., a razão entre a área total dos coletores  $A$  e o volume de armazenamento  $V'$ , expresso em hectolitros, através da alteração do volume;
- ii. Inclinação dos coletores ( $\beta$ );
- iii. Localização do sistema – Foram selecionadas quatro Zonas NUTS III: Cávado (Braga), Grande Lisboa (Lisboa), Algarve (Faro) e Açores (Ponta Delgada);
- iv. Passo de tempo do TRNSYS.

Para o efeito, foi montado um sistema solar térmico, nos dois *softwares*, da forma mais semelhante possível, sendo constituído por um conjunto de coletores com um circuito primário e bomba de circulação, que servem dois sistemas de consumo, formados cada um por depósito de água, sistema de apoio direto ao depósito com controlo temporizado, e circuito secundário (Costa e Aguiar, 2013b).

Os valores de  $G_y$ ,  $H_y$  e  $D_y$  fornecidos ao TRNSYS como input, foram obtidos a partir de dados do Solterm, sendo que no TRNSYS para o cálculo dos valores de radiação incidente sobre o coletor, utilizou-se o modelo de Perez (Perez et al., 1999).

As principais conclusões destes estudos, são que as estimativas de desempenho do sistema solar, para as várias análises de sensibilidade nos dois *softwares* (para passo de tempo 5' no TRNSYS) são próximas, variando no intervalo  $\pm 3\%$  (relativamente às necessidades energéticas) sendo que existe um padrão de variação muito semelhante no estudo da relação  $A/V'$ . Isto conforma que o Solterm 6 é certamente adequado como programa de ajuda ao dimensionamento de sistemas solares, incluindo no contexto e para os fins do SCE e outras políticas públicas tais como o Fundo de Eficiência Energética (FEE) (Costa e Aguiar, 2013b).

Por fim, citando um dos parágrafos finais deste estudo “as análises de sensibilidade mais detalhadas mostram que será difícil obter estimativas de energia ainda mais próximas uma vez que parecem radicar em diferenças algorítmicas de base, tanto na abordagem de processos físicos como na abordagem à solução numérica das equações envolvidas”.

Uma vez que existem várias metodologias de cálculo possíveis em diferentes *softwares*, há sempre um grau de incerteza nos resultados e por consequência na interpretação dos mesmos. Por outro lado, há sempre que ter em conta que os dados de entrada para o dimensionamento – clima e recurso solar, volume, perfil diário e temperatura nas necessidades de consumo – têm eles próprios incerteza. E finalmente, diga-se que o equipamento comercial tem apenas alguns modelos e não gradações do mesmo modelo – por exemplo, os coletores e os depósitos vêm em tamanhos fixos – pelo que não seria possível na prática obedecer estritamente a indicações de otimização rígidas de um sistema pericial.

Concretizando, seria inútil desenvolver um sistema pericial demasiado prescritivo, mesmo na apreciação do que é um desempenho energético “satisfatório” ou “insatisfatório”, nos vários indicadores. Devem assim ser concedidas margens para os valores aconselhados pelas regras periciais que procuram identificar os maus desempenhos energéticos consequência de erros de dimensionamento.

## 5 Estudos numéricos de desempenho energético com sistemas solares de referência

### 5.1 Objetivo

Para a obtenção de regras para o sistema pericial, na maioria heurísticas embora expressas quantitativamente, houve que realizar estudos exploratórios do desempenho energético dos sistemas solares variando a sua configuração e equipamentos. Fizeram-se assim numerosas simulações (na ordem dos milhares) para determinar que parâmetros são mais importantes num dimensionamento, como varia o desempenho com vários parâmetros e que possíveis indicadores seriam mais relevantes para traduzir o desempenho do sistema e balizar as condições de bom dimensionamento.

Neste contexto, é evidente que não se partiu do zero, tendo havido já trabalhos anteriores que exploraram e adotaram algumas soluções que serviram de ponto de partida. Em particular, é conhecido que o parâmetro mais relevante de um dimensionamento é a razão  $A/V'$  já mencionada, e que a fração solar anual (razão entre a energia anual fornecida pelo sistema que tem origem solar, e a energia total anual solicitada pelo consumidor) será o índice mais importante. Contudo, outros parâmetros e índices foram também explorados no presente estudo.

### 5.2 Metodologia

Um problema metodológico básico consistiu em que o próprio *software* Solterm 6 foi evoluindo ao longo do trabalho, tendo sido produzidos pelo menos 20 versões protótipo desde o início ao fim do presente trabalho. Embora o motor de cálculo se tivesse mantido essencialmente idêntico, algumas condições e diagnósticos foram sendo modificados, por isso é importante dizer que foi utilizado na larga maioria dos estudos o protótipo Solterm 6.0.0.24; apenas para o estudo de desempenho com diferentes coletores se utilizou o protótipo Solterm 6.0.0.30.

A grande maioria dos estudos feitos explorou a sensibilidade de um conjunto de indicadores energéticos à razão  $A/V'$ . Assim, temos:

$f_s$  — A fração solar, dada por

$$f_s = \frac{E_s}{L} \quad (5.1)$$

em que  $L$ , é a energia útil solicitada ao consumo (em kWh), sendo portanto a contribuição do sistema solar em si para as necessidades AQS, contabilizada numa base anual;

$\pi_s$  — A produtividade, é dada por

$$\pi_s = \frac{E_s}{A} \quad (5.2)$$

Trata-se da energia solar fornecida específica (por unidade de área de coletor). É um índice frequentemente fornecido em análises de sistemas solares, contudo, verifica-se que é bastante dependente dos detalhes do valor e padrão de consumo, e muito sensível ao nível de recurso solar (Aguiar e Coelho, 2012).

$\rho_s$  — O rendimento global do sistema, dado por

$$\rho_s = \frac{E_s}{G_y} \quad (5.3)$$

É uma medida da eficácia do sistema solar em transferir energia da radiação solar para a carga. Trata-se de uma indicação interessante como guia para dimensionamentos, porque é menos dependente dos detalhes do consumo, e em particular menos do nível de recurso solar, do que a fração solar ou a produtividade (Aguiar e Coelho, 2012).

$\psi$  — As perdas térmicas relativas, calculadas por

$$\Psi = \frac{P_0}{(E_s + E_a)} \quad (5.4)$$

em que, a energia final perdida,  $P_0$ , é dada por

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 \quad (5.5)$$

Este índice contabiliza a energia final perdida pelo sistema, face ao que este produz anualmente.

Existem muito numerosas alternativas de configuração de um sistema solar térmico, assim como dos equipamentos utilizados, controlo, consumos, etc. Sendo impraticável explorar logo de início toda esta grande variedade de casos, foi decidido começar por utilizar condições típicas, traduzidas numa configuração de referência e em equipamentos também com características de referência, como se explicará de seguida.

Uma opção seguida foi a de adotar no que fosse possível as condições padrão do Regulamento de Edifícios de Habitação (REH) do Sistema de Certificação de Edifícios (SCE) (DL 118/2013), especificadas para o cálculo da energia mínima a fornecer por sistemas de energias renováveis.

Assim a captação de energia solar, ficou em conformidade com os regulamentos, de acordo com a Portaria n.º 349-B/2013, que descreve um “coletor padrão” para cálculos:

“1 - Os sistemas de coletores solares térmicos a instalar devem proporcionar uma contribuição de energia renovável igual ou superior à calculada para um sistema idêntico ao previsto ou instalado, baseado em coletores solares padrão com as seguintes características:

a) Orientação a Sul e com inclinação de 35°;

- b) Apresentação dos seguintes parâmetros geométricos, óticos e térmicos:
- Planos com área de abertura de 0,65 m<sup>2</sup> por habitante convencional;
  - Rendimento ótico de 73%;
  - Coeficientes de perdas térmicas  $a_1 = 4,12 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  e  $a_2 = 0,014 \text{ W/(m}^2\text{K}^2)$ ;
  - Modificador de ângulo de incidência para incidência de 50° igual a 0,91.”

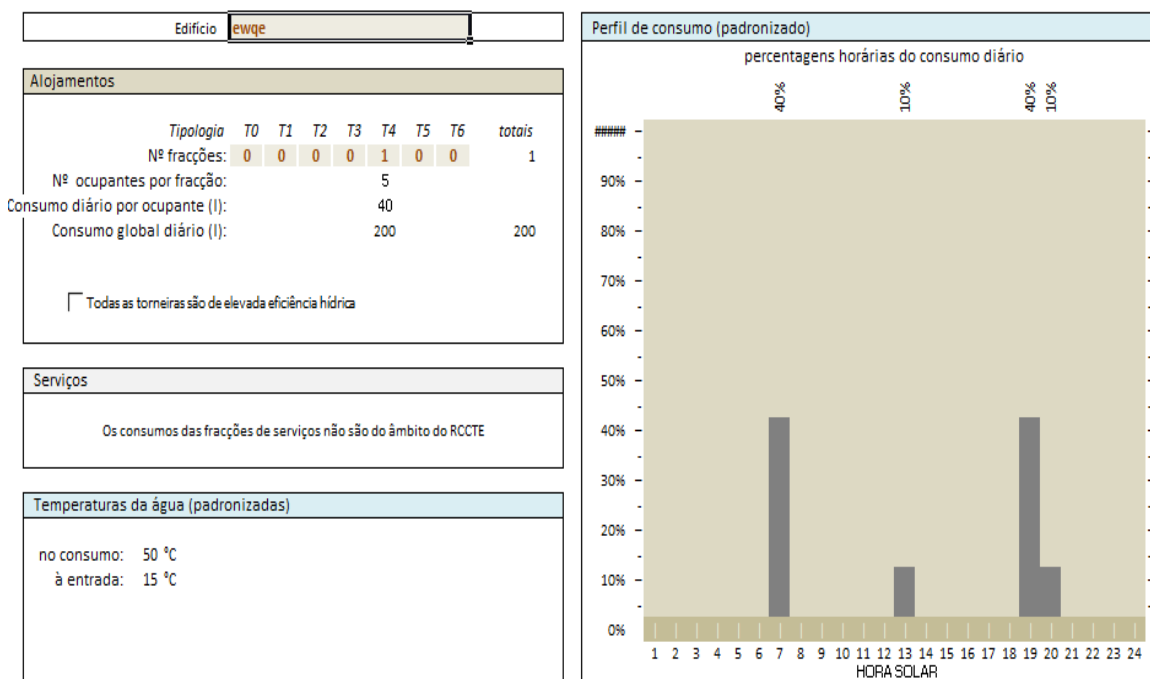


Figura 5.1 - Distribuição de frações, necessidades AQS e perfil de consumo padronizado

Para a definição do tipo de consumo, admitiu-se a tipologia T3, que corresponde a um número de habitantes convencional igual a 4 e portanto respeitando a regra de um coletor por pessoa, tal implica 2,6 m<sup>2</sup> totais de área de captação. O perfil de consumo é o indicado pela ADENE, como se pode observar na Fig. 5.1.

No que diz respeito a outros parâmetros, adotaram-se como ponto de partida valores arbitrários que foram empregues ou sugeridos pelo resultado de estudos anteriores de validação do Solterm 6, designadamente os de Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b e que comporão a base inicial do sistema pericial, na sua primeira fase (pré-simulação).

Assim estudou-se apenas a configuração do sistema solar com um depósito e um ponto de consumo independente, com apoio energético embebido na parte superior do depósito, um permutador na base do depósito. A extração de água é no topo e entrada de água nova na base. Não há permutadores adicionais nem no circuito primário nem no circuito de distribuição.

As características do depósito, das bombas e fluido circulante no circuito primário e eficácia do permutador ( $\epsilon$ ) embebido na base do depósito que foram utilizadas para as condições iniciais de simulação destes estudos serão também propostas para a construção do sistema

pericial, por isso, podem ser consultadas nas secções 6.2 e 6.3 (com exceção de 6.3.3 que são regras de boas práticas decorrentes das simulações), nas eqs. 6.1 a 6.11.

A Fig. 5.2 mostra a interface do Solterm 6 (versão protótipo 6.0.0.24) onde se especificam estes parâmetros.

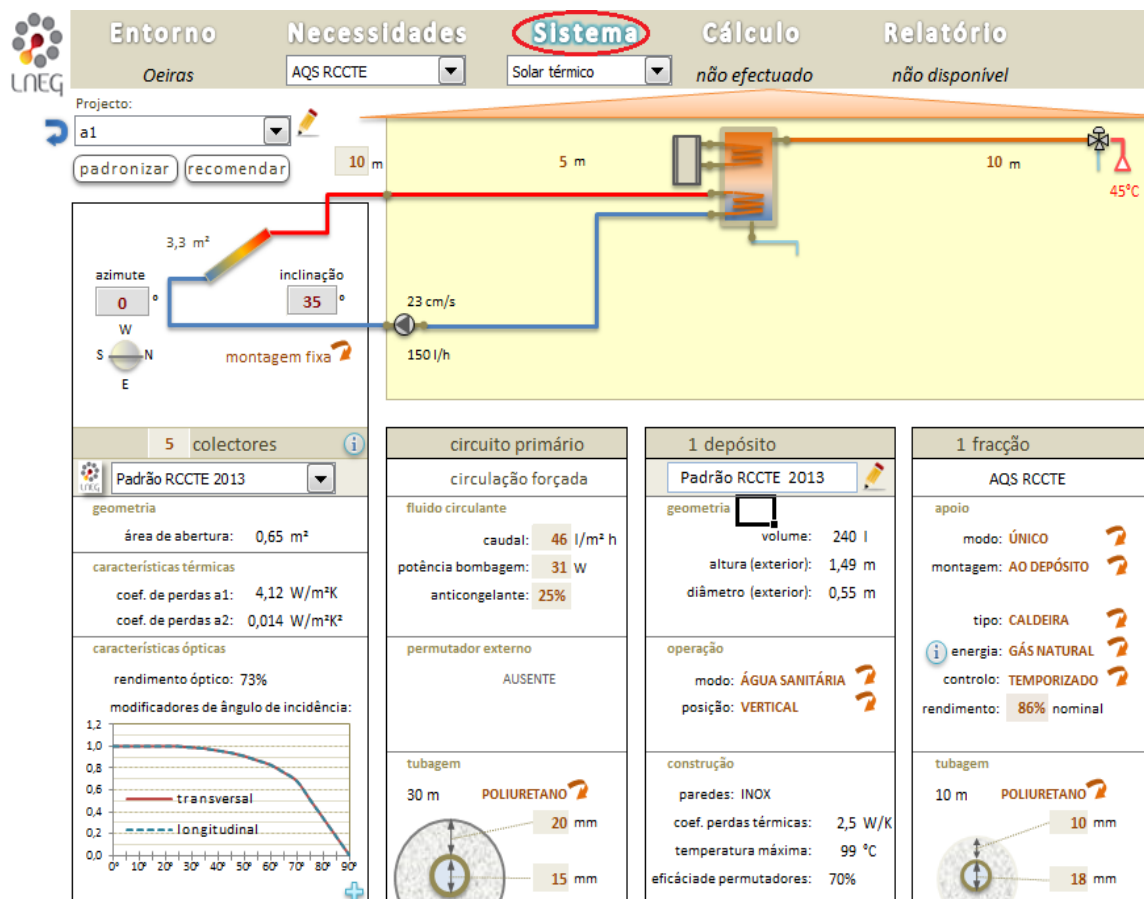


Figura 5.2 – Especificação das características do sistema solar térmico de referência.

A gama de  $A/V'$  que se pode explorar é restringida pelas condições de validade dos algoritmos de cálculo, viz. das equações de balanço térmico para condições quase-estacionárias. Na prática isto impede a especificação de depósitos de pequeno volume em relação ao consumo diário, ou de pequenas áreas totais de coletores, i.e. muito subdimensionadas. Por outro lado, também se impede a especificação de volumes de armazenamento muito grandes, sobredimensionados, em que a energia que os coletores injetam no depósito é tão pequena que não causa convecção; ou pelo contrário de áreas de coletores demasiado grandes, que levariam a injetar tanta energia no depósito que a convecção seria em regime turbulento. As experiências de validação (Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b) demonstraram a gama aceitável de  $A/V'$  seria entre  $0,5 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  e  $3,0 \text{ m}^2/100 \text{ l}$ .

Como o número de coletores é discreto, e neste estudo, a razão  $A/V'$  foi quase sempre variada por alteração da área e não do volume, isto significou que no máximo apenas 12 pontos  $A/V'$  puderam ser examinados em cada exploração de desempenho do sistema solar, viz. Entre  $0,27 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  e  $3,25 \text{ m}^2/100 \text{ l}$ , e isto já forçando um pouco os limites de validade do motor de



cálculo. Contudo, foi retirado *a posteriori* o ponto correspondente a  $0,27 \text{ m}^2/100 \text{ l}$ , por os valores de perdas térmicas terem sido nalguns casos negativos. Assim, fixou-se o estudo em 11 pontos  $A/V'$ , entre dois coletores padrão e doze.

Houve ainda casos de estudo variando  $V$  e não  $A$  e nesse caso os limites inferior e superior para a relação  $A/V'$  foram, respetivamente,  $0,65 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  (correspondente à utilização de um depósito com capacidade de armazenamento de  $500 \text{ l}$ ) e  $3,25 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  (o que corresponde à utilização de um depósito com capacidade de armazenamento de apenas  $100 \text{ l}$ ) com uma área de instalação correspondente à de cinco coletores padrão.

### 5.3 Sensibilidade dos indicadores à razão $A/V'$

Nas Fig. 5.3 a 5.6 mostram-se as curvas obtidas para a variação dos principais indicadores de desempenho energético, em função de  $A/V'$  tanto no caso onde se variou a área de coletores mantendo  $V$  constante, como no caso da variação do volume do depósito, mantendo  $A$  constante.

Verifica-se nas Fig. 5.3 e 5.4, que o rendimento e produtividade baixam com o aumento de  $A/V'$  seja pelo aumento de área ou diminuição do volume. O maior decaimento é verificado quando se varia a área e se mantém o volume de armazenamento fixo, o que sugere que um sistema pericial para responder a dimensionamentos que apresentem produtividade e rendimento fora de limites razoáveis deve privilegiar primeiro o ajuste da área e só depois o ajuste da capacidade do depósito.

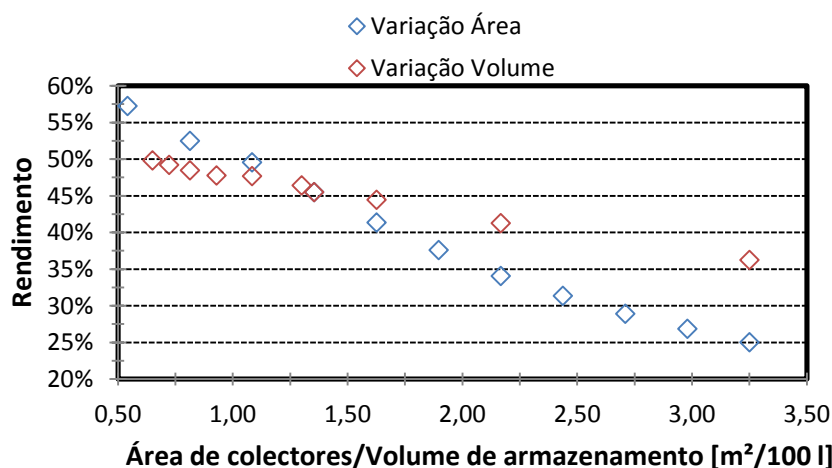


Figura 5.3 - Curvas de rendimento em função de  $A/V'$ , com variação de  $A$  e  $V$  separadamente

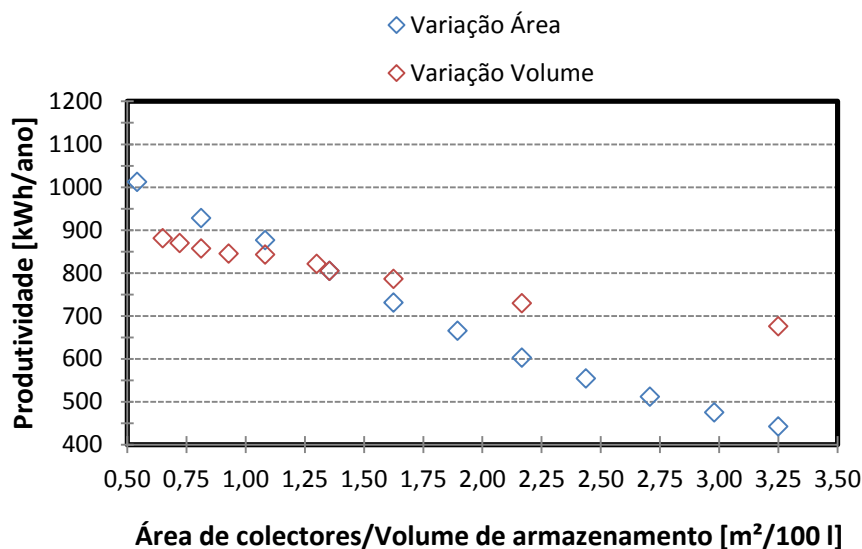


Figura 5.4 - Curvas de produtividade em função de  $A/V'$ , com variação de A e V separadamente

Analisando a Fig. 5.5, relativa à fração solar, constata-se que esta aumenta quase em proporção ao número de colectores, até cerca de  $1,5 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  e depois mais devagar, tendendo para um patamar – neste caso de cerca 90% – até ao máximo de  $A/V'$  investigado, que foi  $3,25 \text{ m}^2/100 \text{ l}$ . Pode dizer-se que, para este sistema de referência, de um ponto de vista técnico a partir de  $2,0 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  já é pouco eficaz aumentar a área de colectores para melhorar o fornecimento de energia solar pelo sistema, o que corresponde em termos económicos a ter o sistema sobredimensionado. Este valor de  $2,0 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  vai ressurgir mais à frente noutras análises como um valor fronteira da região de sobredimensionamentos.

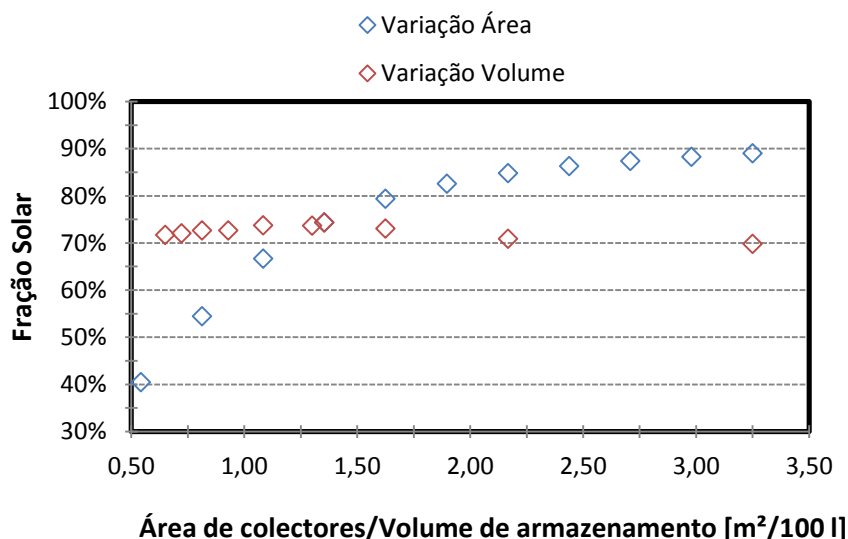


Figura 5.5 - Curvas de fração solar em função de  $A/V'$ , com variação de A e V separadamente.

No que se refere à variação com a capacidade do depósito, cf. ainda a Fig. 5.5, ela é fraca e mesmo irregular, o que se pode dever ao comportamento das perdas térmicas do depósito. Uma vez que a fração solar é o indicador energético mais importante no desempenho de um sistema solar térmico, esta constatação reforça as conclusões anteriores de que *num processo de dimensionamento é aconselhável começar por ajustar o número de coletores e só depois ajustar a capacidade de armazenamento do depósito.*

A Fig. 5.6 mostra que as perdas térmicas aumentam com o número de coletores, como esperado uma vez que aumenta a área para transferência de calor nos coletores e aumenta a temperatura de armazenamento no depósito.

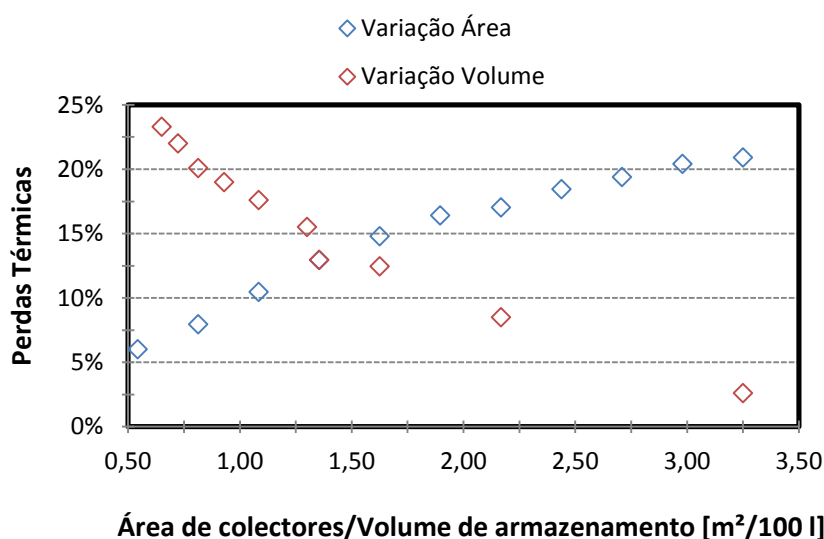


Figura 5.6 - Curvas de perdas térmicas em função de  $A/V'$ , com variação de A e V separadamente

Pelo contrário, quando se aumenta o volume de armazenamento as perdas térmicas baixam, uma vez que diminui a temperatura de armazenamento e diminui a relação entre volume de água quente armazenada e área da superfície do depósito.

Noutra perspetiva, as perdas térmicas no depósito são quase sempre muito superiores às que ocorrem nos circuitos primário e de distribuição; logo, *quando em resultado de um dimensionamento se verificar que as perdas térmicas são elevadas, deverá ser verificado em primeiro lugar o volume de armazenamento.*

#### 5.4 Sensibilidade ao clima

Fixado o volume do depósito no dimensionamento, foram efetuados estudos onde se variou a área de coletores para varrer a gama  $A/V'$  e se investigou a sensibilidade a outros fatores que condicionam o dimensionamento.

Em primeiro lugar foi avaliado o fator clima. Foram selecionadas três regiões NUTS III de Portugal Continental, escolhidas pela sua diferença geográfica e climática: uma região no norte (Cávado), centro (Lisboa) e sul (Algarve) do país.

A figura 5.7, mostra que o rendimento praticamente não se altera com o clima: a maior diferença de valores registada entre as curvas foi de 2%. Note-se que este indicador energético avalia o desempenho do sistema solar independentemente da irradiação média que capta (se se fixar o tipo e a orientação dos coletores).

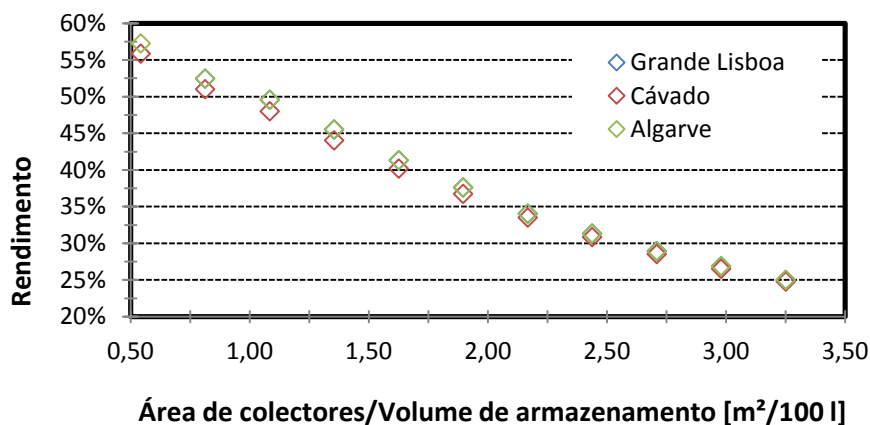


Figura 5.7 - Curvas de rendimento em função de  $A/V'$ , em 3 zonas típicas

Nas Figs. 5.8 e 5.9, o indicador de produtividade  $\pi_s$  e a fração solar  $f_s$  apresentam a mesma tendência em todos os climas. Note-se que ao contrário de  $\rho_s$ , os indicadores  $\pi_s$  e  $f_s$  dependem de  $G_y$ , logo é de esperar que dependam do clima. A lição a retirar aqui é que o padrão de variação versus  $A/V'$  é similar em todos os climas.

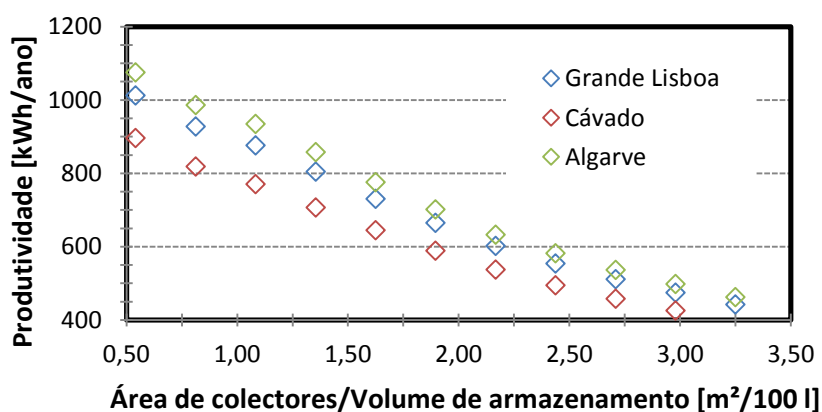


Figura 5.8 - Curvas de produtividade em função de  $A/V'$ , em 3 zonas típicas

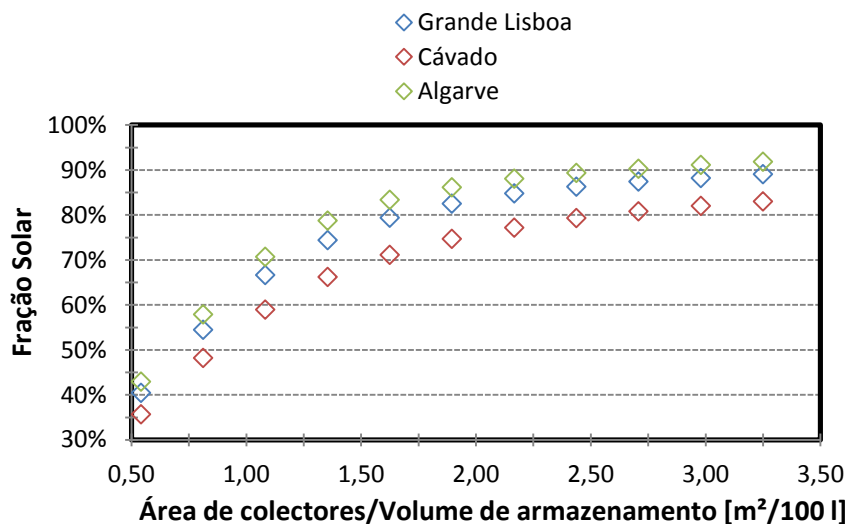


Figura 5.9 - Curvas de fração solar em função de  $A/V'$ , em 3 zonas típicas

Na Fig. 5.10, as perdas térmicas  $\psi$  aumentam com a razão de dimensionamento  $A/V'$ , de forma similar para todos os climas, mas a partir de  $2 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  divergem à medida que o sistema fica sobredimensionado.

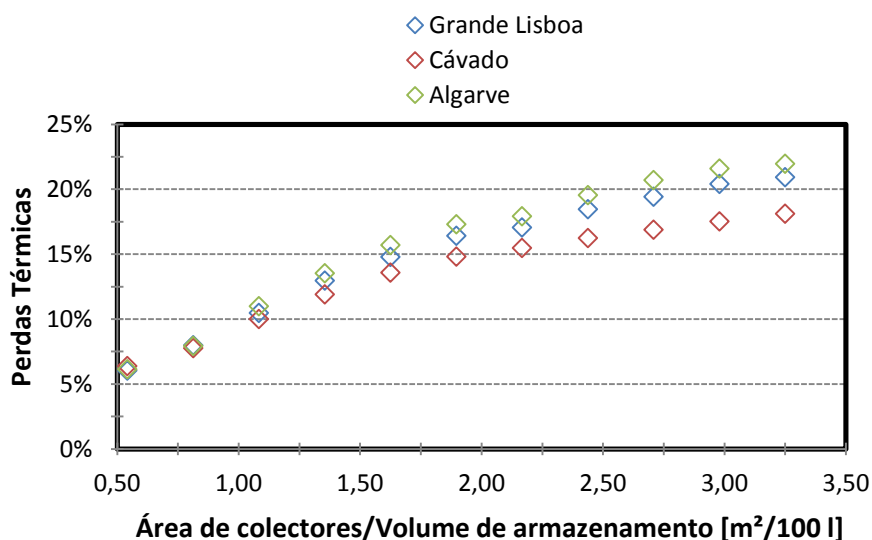


Figura 5.10 - Curvas de perdas térmicas em função de  $A/V'$ , em 3 zonas típicas

Todas as curvas de desempenho energético obtidas da região de Lisboa, têm o mesmo padrão e têm valores intermédios em relação às duas outras regiões estudadas, assim para as explorações seguintes escolheu-se esta zona de Grande Lisboa como representativa.

### 5.5 Sensibilidade à temperatura de consumo

No estudo que se a seguir se descreve, variou-se a temperatura média pretendida no consumo,  $T_L$ , de 40°C a 70°C, vd. Figs. 5.11 a 5.14.

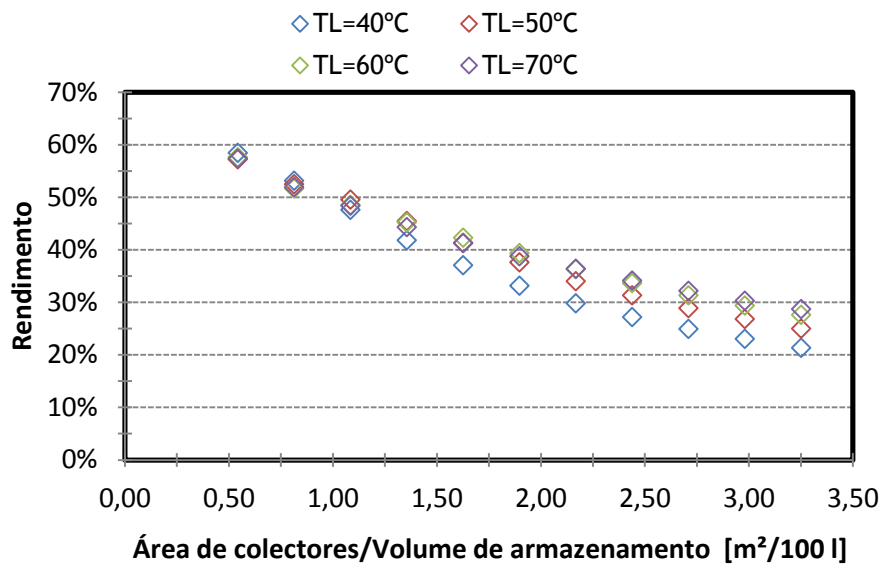


Figura 5.11 - Curvas de rendimento em função de  $A/V'$ , para diferentes  $T_L$

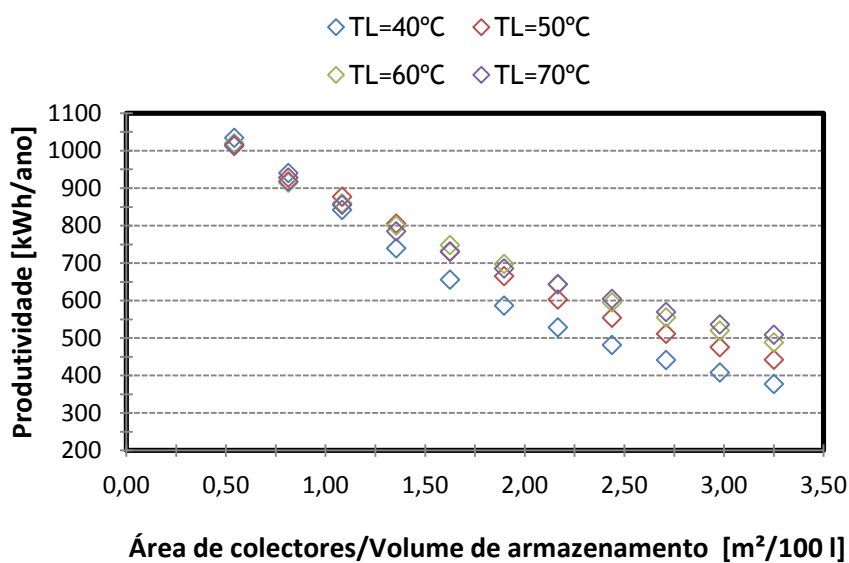
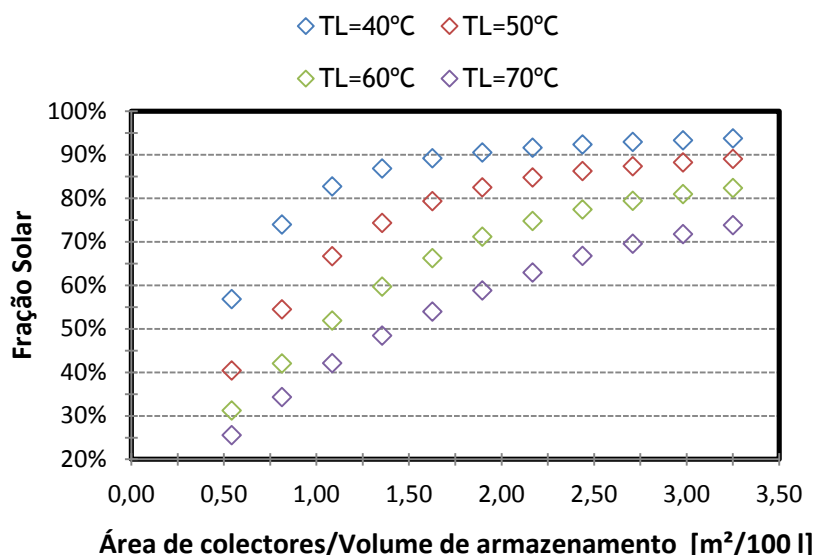
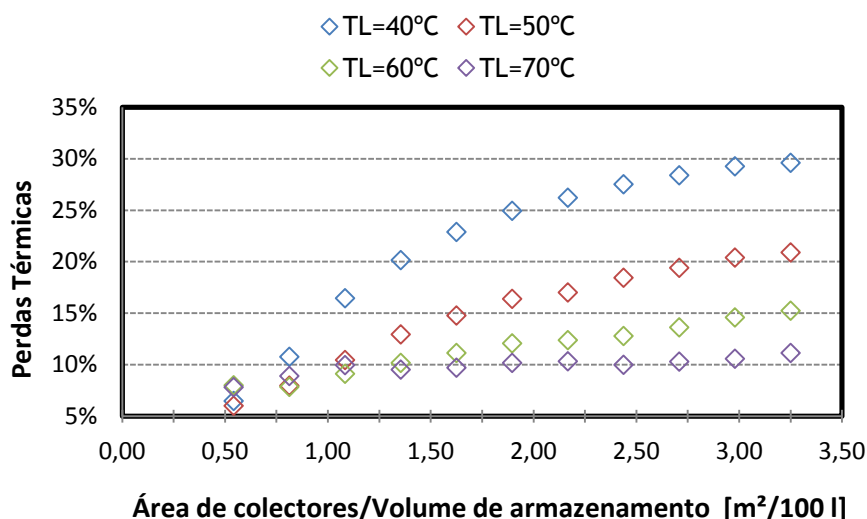


Figura 5.12 - Curvas de produtividade em função de  $A/V'$ , para diferentes  $T_L$

Figura 5.13 - Curvas de fração solar em função de  $A/V'$ , para diferentes  $T_L$ Figura 5.14 - Curvas de perdas térmicas em função de  $A/V'$ , para diferentes  $T_L$ 

Para cada índice existe uma tendência bem definida, que no caso de  $f_s$  e  $\psi$  estabiliza em zonas de sobredimensionamento de área para  $T_L$  entre os 40°C e os 60°C. No caso da curva relativa a 70°C, esta estabiliza ainda para  $A/V'$  baixos. Na Fig. 5.13, verifica-se que quanto menor  $T_L$ , maior  $f_s$ , uma vez que a energia necessária ao aquecimento do fluido é menor, logo o sistema solar térmico consegue responder mais depressa às necessidades térmicas.

Seja como for, para cada  $T_L$ , existe um limiar a partir do qual parece não compensar aumentar a área para obter maior  $f_s$ , e com maior  $T_L$  o aumento de  $\psi$  tende a estabilizar para  $A/V'$  mais baixos. Como regra heurística pode dizer-se que *esse limiar é de cerca 1 m² / 100 l para temperatura de consumo acima de 60 °C, e 2 m² / 100 l para temperaturas de consumo abaixo de 50 °C.*

Apesar de o valor de  $f_s$  ser bastante superior para 40°C, as perdas térmicas, produtividade e rendimento são mais baixas que com temperaturas de consumo mais elevadas. Assim

confirma-se que no dimensionamento *a temperatura-alvo de consumo deve ser estabelecida em valores o mais baixos possível que ainda proporcionem a satisfação dos utilizadores.*

## 5.6 Sensibilidade ao perfil de consumo

Neste estudo, variou-se o perfil de consumo, simulando além do desempenho com o perfil padrão de consumo, um perfil com consumo constante das 8h às 17h (10% do total em cada hora) e outro perfil em que o consumo diário ocorre de uma vez só, no final do dia, às 18h (o que foi utilizado como padrão na versão 5 do Solterm).

Verifica-se que o comportamento de  $\rho_s$  e  $\pi_s$  (Fig. 5.15 e 5.16) é pouco sensível ao perfil de consumo.

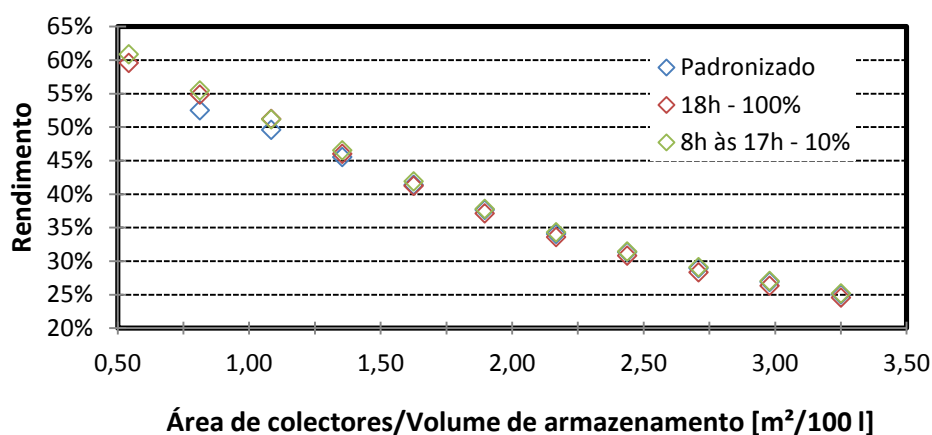


Figura 5.15 - Curvas de rendimento em função de  $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo

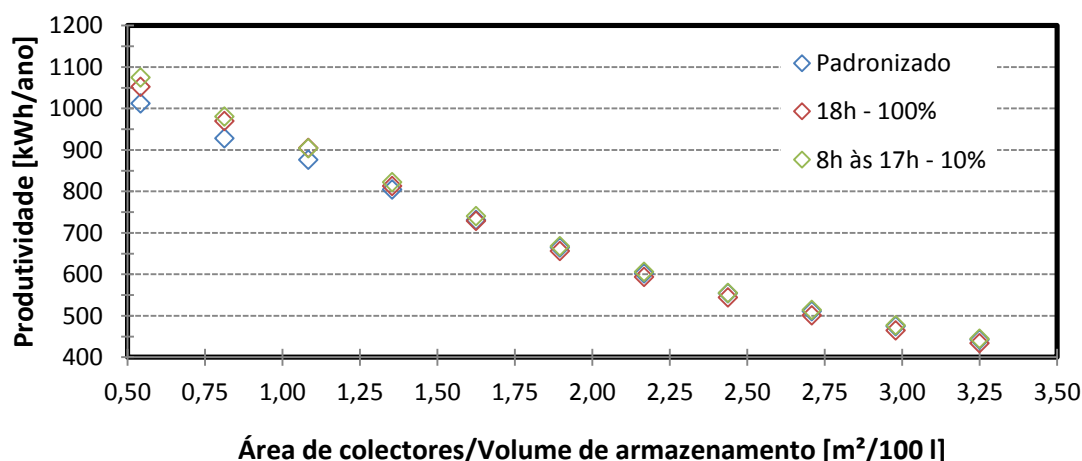


Figura 5.16 - Curvas de produtividade em função de  $A/V'$ , para diferentes perfis de consumo

Constata-se também que *a fração solar é pouco sensível ao perfil de consumo*, cf. Fig. 5.17. Em sistemas sobredimensionados não há diferenças significativas. Em sistemas bem dimensionados é mais vantajoso em termos de energia fornecida, ir acumulando água quente para ser consumida de uma vez só ao fim da tarde. Pelo contrário o consumo de água quente



ao início da manhã penaliza o desempenho. Seja como for é interessante notar que a diferença máxima é da ordem de apenas 5% na fração solar.

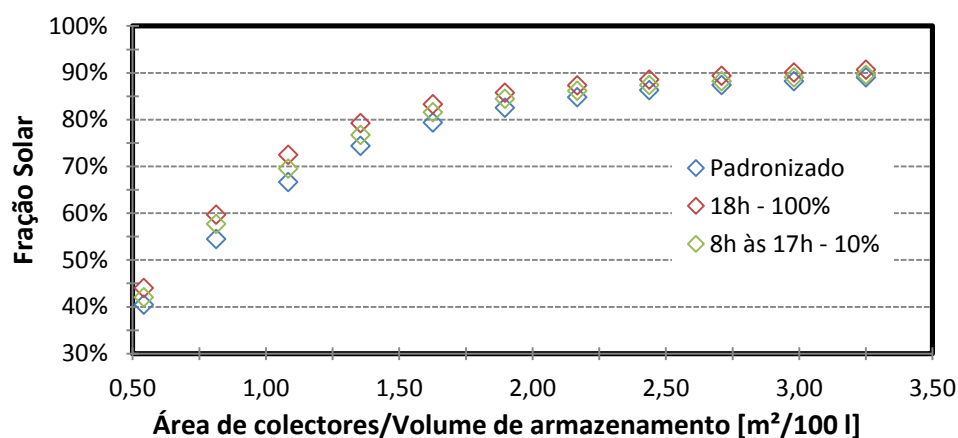


Figura 5.17 - Curvas de fração solar em função de A/V', para diferentes perfis de consumo

Quanto às perdas térmicas (cf. Fig. 5.18), note-se que quando se tem um perfil com pico de consumo às 18h, elas são inferiores comparativamente aos restantes perfis. Isto deve decorrer principalmente de quase não se armazenar água quente durante a noite.

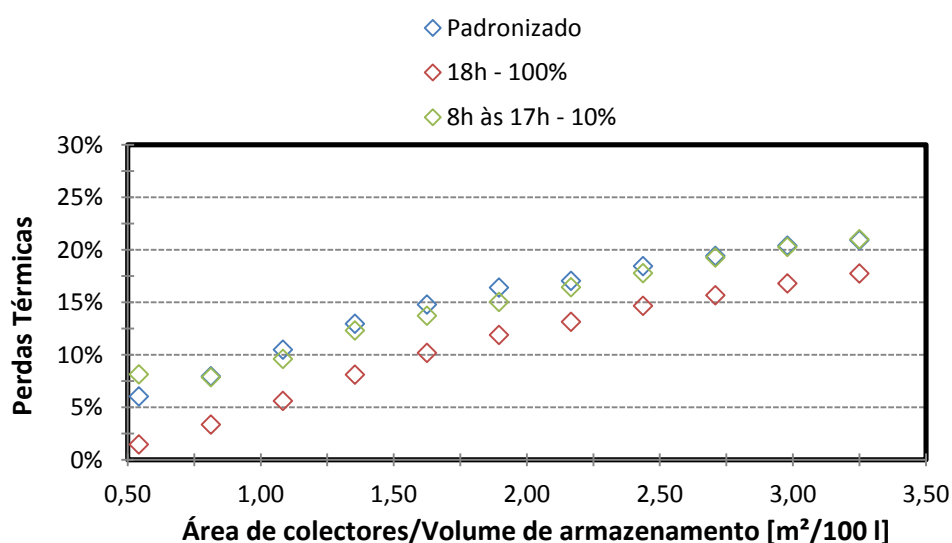


Figura 5.18 - Curvas de perdas térmicas em função de A/V', para diferentes perfis de consumo

## 5.7 Sensibilidade ao modelo de coletor

O desempenho energético também depende do coletor que se utiliza. Este é aliás um dos principais fatores. A questão que se aborda neste ponto dos estudos é a de saber em que medida os resultados e conclusões anteriores, executados com o coletor padrão, podem ser generalizados a outros coletores.

É difícil classificar coletores como “melhores” ou “piores”, uma vez que há vários fatores a considerar, como o custo,  $T_L$  para que foram desenhados, etc. Numa tentativa de estabelecer

um critério objectivo, inicialmente apenas de um ponto de vista energético, consideraram-se algumas hipóteses.

Uma primeira ideia seria comparar o desempenho de um sistema com certo modelo de coletor comercial, com o mesmo sistema mas com o modelo de coletor padrão (virtual). Esta solução tem dois defeitos. O primeiro é que a simulação deste segundo sistema solar “de referência”, com coletores virtuais, duplica o tempo de resposta do *software*; o segundo é que a comparação não é realmente objetiva pois em princípio o sistema de referência deveria ser redimensionado (caudais, depósito, etc.) devido à própria mudança para um modelo de coletor de características diferentes.

Uma segunda solução estudada, e que foi a adotada, foi a de um critério de “produtividade limite” do coletor,  $\pi_{s(max)}$ . O conceito é o de calcular (para certa região e orientação) a produtividade dos coletores solares como se não estivessem ligados a nenhum depósito de acumulação, injetando permanentemente água fria (da rede) e recolhendo a energia térmica na água quente resultante. Neste contexto não há portanto perdas térmicas ligadas a tubagens e depósitos, nem se contabilizam consumos parasíticos, obtendo-se o máximo de energia possível com os coletores.

Este cálculo de produtividade limite pode ser feito em computador muito rapidamente, em alguns segundos, ao contrário da simulação detalhada de um sistema solar, não prejudicando pois a rapidez de resposta do *software*.

Em conclusão, a solução que se testou foi a de ter um índice de qualidade de um coletor (comercial) que é a razão entre a sua produtividade limite e a produtividade limite do coletor padrão (virtual); depois este índice poderia eventualmente ser utilizado para ajustar os resultados e regras periciais atrás exploradas para o caso do coletor padrão.

Para a análise da utilidade deste critério selecionaram-se quatro coletores comerciais: dois com produtividade limite superior à do coletor padrão e outros dois com produtividade limite inferior. As características térmicas principais destes quatro coletores podem ser consultados no Anexo B.

Estes estudos foram feitos com simulações no Solterm 6.0.0.30. Esta versão de desenvolvimento (“build”) apresenta algumas diferenças relativamente à versão utilizada para as explorações anteriores. O indicador energético  $\psi$  é calculado doutra forma, acrescentando à equação 5.5 os consumos parasíticos das bombas,  $P_4$ . Este novo indicador será denominado por perdas térmicas totais,  $\psi'$ , expresso igualmente em percentagem.

Há ainda dificuldades operacionais que importa mencionar. Ao utilizar diferentes coletores, não é possível obter resultados para os mesmos valores  $A/V'$ , já que são construídos com  $A_a$  diferentes e, é claro, números inteiros de coletores. Como  $A_a$  do coletor padrão é bastante inferior ao da generalidade dos coletores comerciais, o número de pontos possíveis de  $A/V'$  (para um mesmo consumo de 200 l diários), é bem menor que com o coletor padrão. Assim o consumo especificado foi aumentado para 1000 l diários (5 residências  $T_4$ ), com um armazenamento distribuído (5 depósitos).

O coletor Intersol TC-H25 apresenta  $A_a$  superior aos restantes, o que significa que em comparação é o que admite menos pontos  $A/V'$ , neste caso 13. Assim, foram apenas admitidos 13 pontos desta razão (com 3 a 15 coletores), para todos os coletores, de forma a que os valores escolhidos fossem o mais próximo possível dos valores  $A/V'$  para o Intersol TC-H25 (iteração de 3 a 15 coletores, um a um).

As Fig. 5.19 a 5.22, mostram um comportamento semelhante das curvas de desempenho para os coletores testados. Numa primeira abordagem, com exceção da curva de  $\psi'$  pertencente ao coletor Vicoren CPC 12 OEM, pode-se considerar, de que se tratam de curvas aproximadamente paralelas entre si na gama intermédia de  $A/V'$ .

Também, como esperado, quanto mais elevado for  $\pi_{s(\max)}$ , maiores serão os valores de  $\rho_s$ ,  $\pi_s$ ,  $f_s$  e  $\psi'$ .

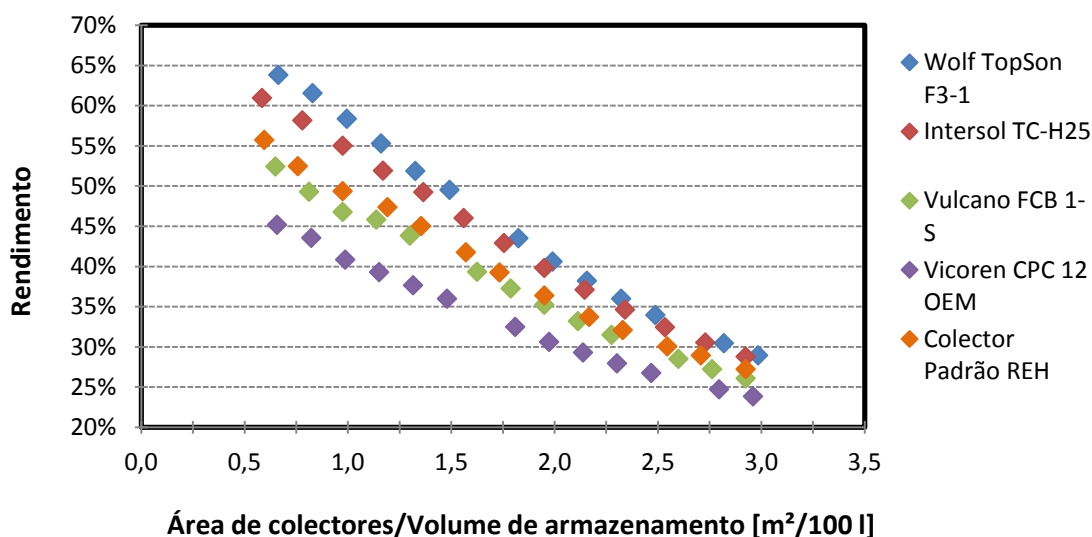


Figura 5.19 – Curvas de rendimento em função de  $A/V'$ , em diferentes coletores

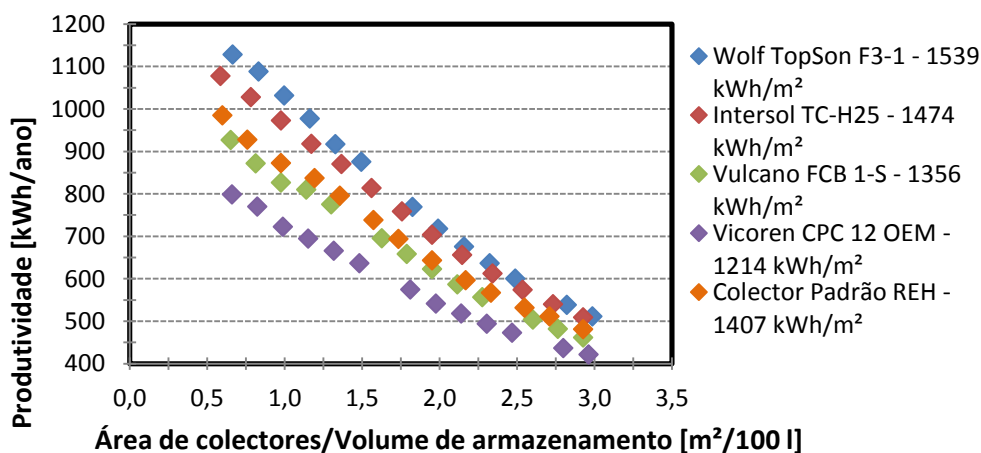
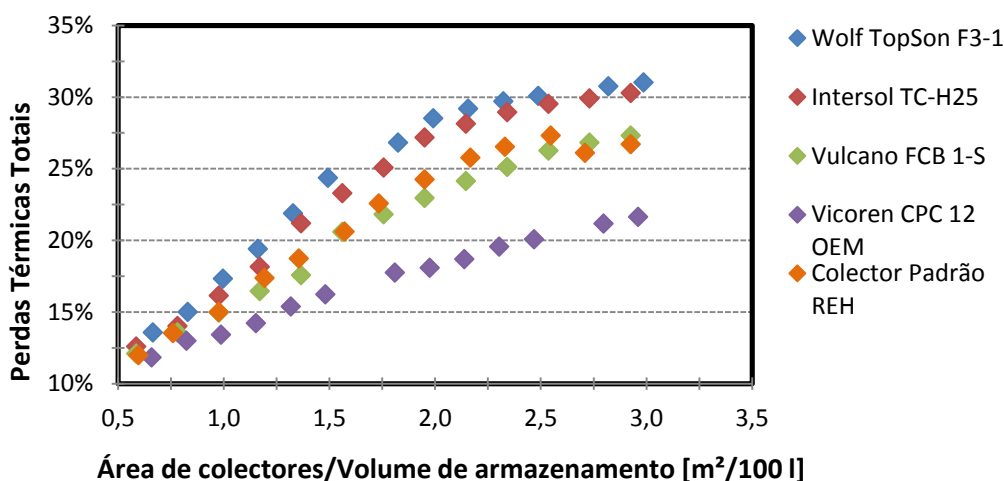
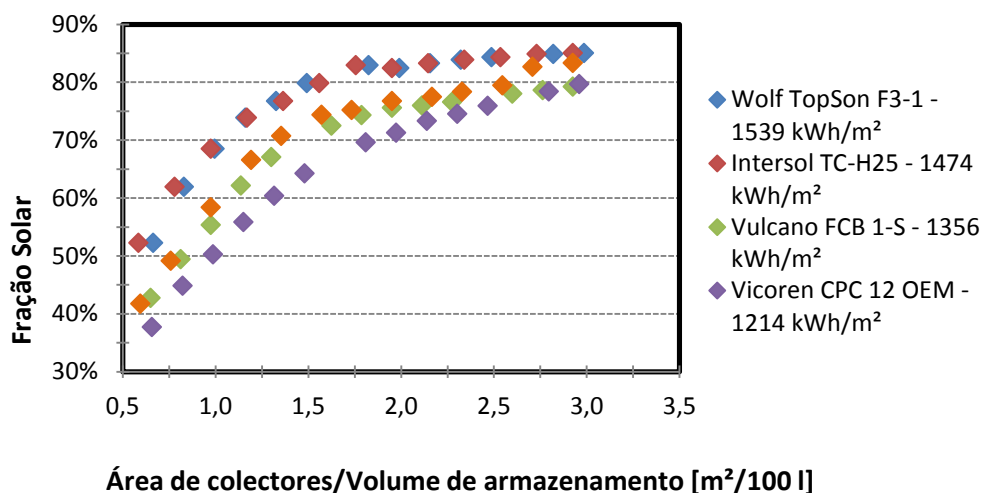


Figura 5.20 – Curvas de produtividade em função de  $A/V'$ , em diferentes coletores



Do ponto de vista da criação de um sistema pericial, isso permite a esperança de poder adaptar as regras de sistemas com coletores padrão, para sistemas com coletores comerciais. No entanto as apreciações anteriores não são estritamente válidas sobre toda a gama de  $A/V'$ , e em particular as curvas convergem para valores altos de  $A/V'$  (ou baixos, no caso das perdas térmicas). Por outro lado, pode haver fatores que impeçam esta adaptação de regras, por exemplo as características construtivas e/ou óticas (e.g. o Vicoren CPC 12 OEM é um CPC). Este assunto será de novo retomado e explorado em mais profundidade.

## 5.8 Exploração das relações entre indicadores energéticos

Os indicadores energéticos não variam independentemente uns dos outros, sendo interessante verificar se é possível identificar e modelar a relação entre eles. Em caso afirmativo, alguns dos indicadores poderiam ser considerados redundantes e retirados da análise oferecida pelo Solterm 6 (e do sistema pericial).

Para tal, estudou-se a relação entre indicadores dois a dois, dependendo do clima, temperatura média no consumo, perfil de consumo e tipo de coletor.

### 5.8.1 Rendimento e produtividade

As Fig. 5.23, 5.24, 5.25 e 5.26 mostram que a relação entre  $\rho_s$  e  $\pi_s$  é forte e do tipo linear. Note-se além disso que a relação entre estes indicadores energéticos é praticamente insensível ao tipo de perfil de consumo e de coletor, assim como a  $T_L$ .

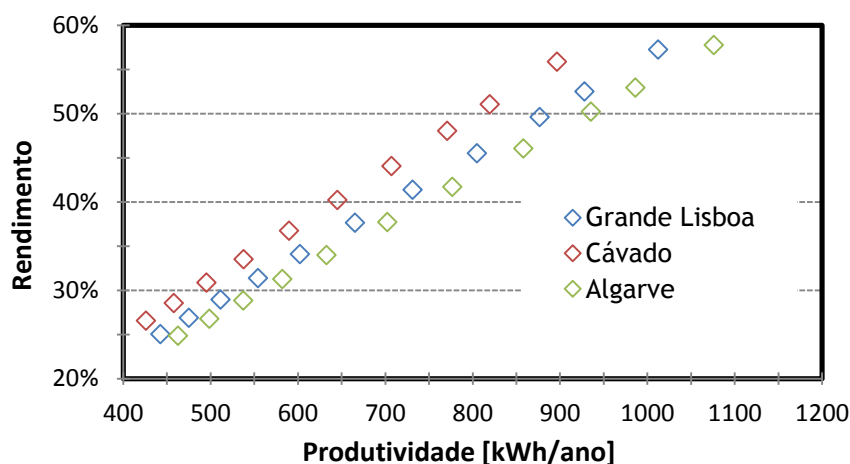


Figura 5.23 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, em 3 zonas típicas.

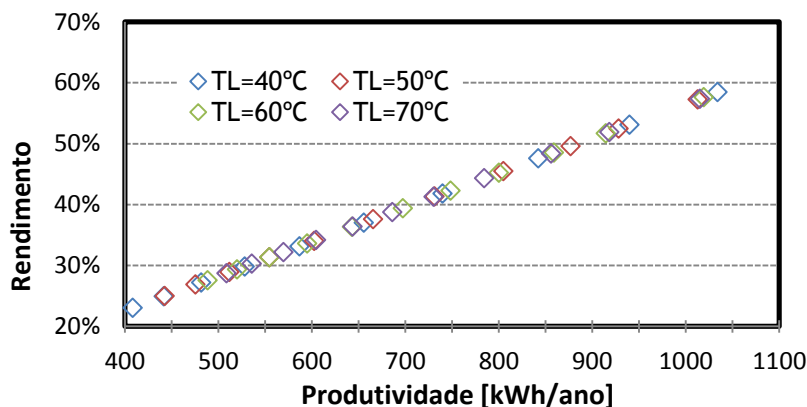


Figura 5.24 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes  $T_L$ .

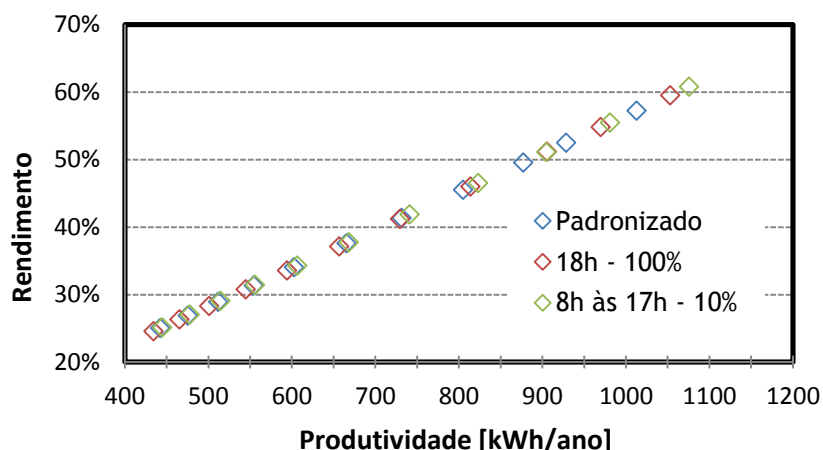


Figura 5.25 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes perfis de consumo

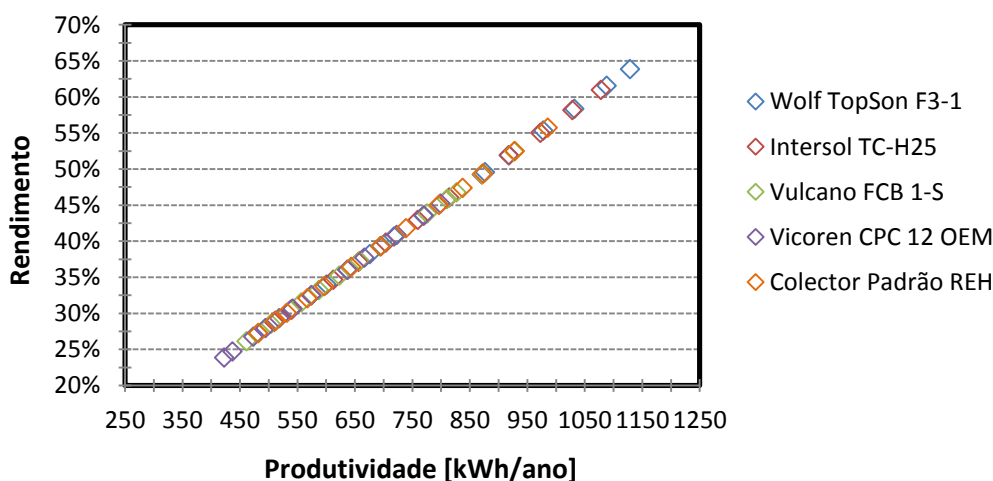


Figura 5.26 - Curvas de rendimento Vs Produtividade, para diferentes tipos de coletor

Realça-se que ao contrário de  $\pi_s$ ,  $\rho_s$  é praticamente independente de  $G_y$ . Assim apenas na Fig. 5.23, relativa à sensibilidade ao clima, há diferenças entre as curvas de rendimento vs produtividade.

Em conclusão, *o indicador produtividade é largamente redundante com o indicador rendimento, mas este tem a vantagem de ser independente do clima, e portanto deve ser usado de preferência.*

### 5.8.2 Rendimento e fração solar

As curvas de rendimento vs fração solar (Fig.5.27 a 5.30), mostram que quanto maior  $f_s$ , menor  $\rho_s$ , havendo limiares a partir dos quais não é aconselhado aumentar a fração solar satisfeita pelo sistema solar, pois o rendimento começa a baixar abruptamente.

Se a relação entre estes indicadores energéticos é praticamente insensível ao perfil de consumo, o mesmo não se verifica com alterações de clima,  $T_L$  e tipo de coletor. De facto,

registam-se diferenças entre os valores das curvas, para a mesma abcissa que podem ultrapassar os 10% e 20%, para diferentes regiões (Fig. 5.27) e  $T_L$  (Fig. 5.28), respetivamente.

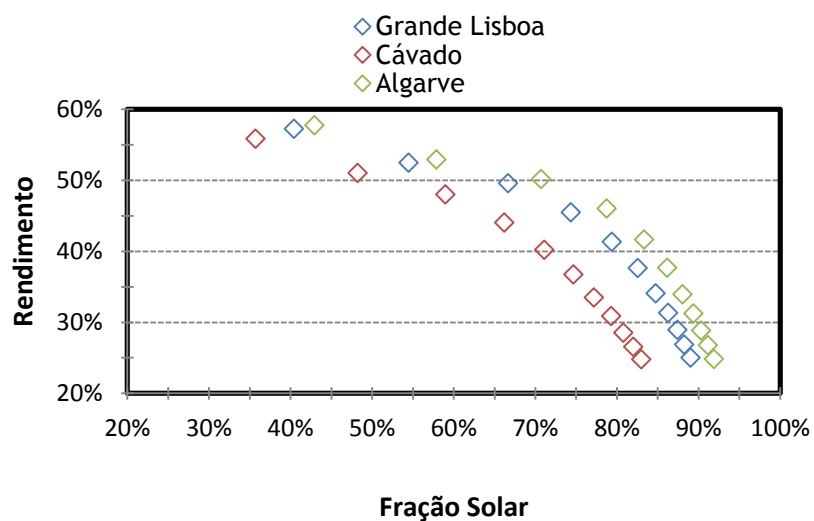


Figura 5.27 - Curvas de rendimento Vs fração solar, em 3 zonas típicas

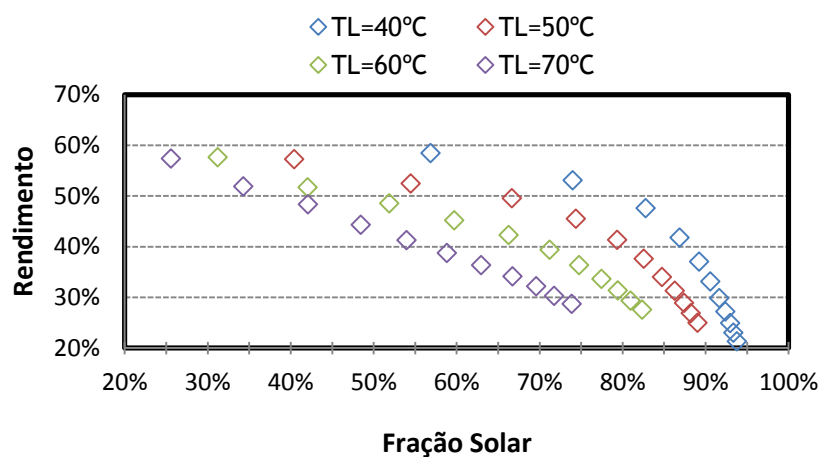


Figura 5.28 - Curvas de rendimento Vs fração solar, para diferentes  $T_L$

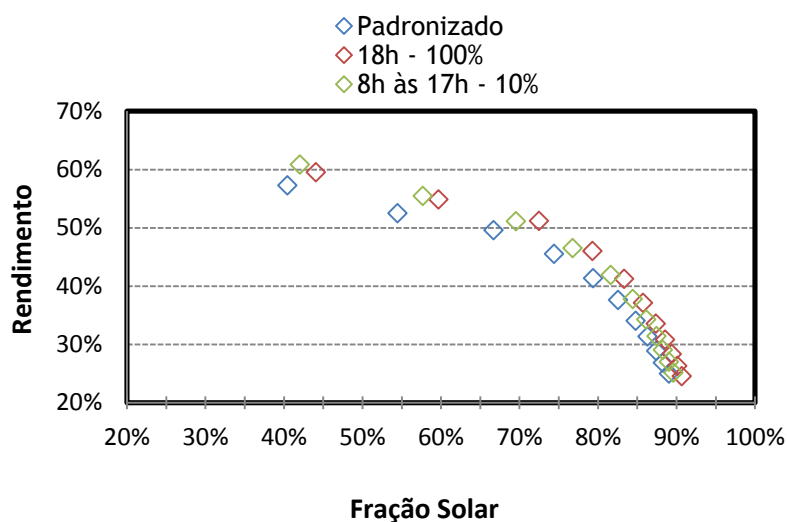


Figura 5.29 - Curvas de rendimento Vs fração solar, para diferentes perfis de consumo

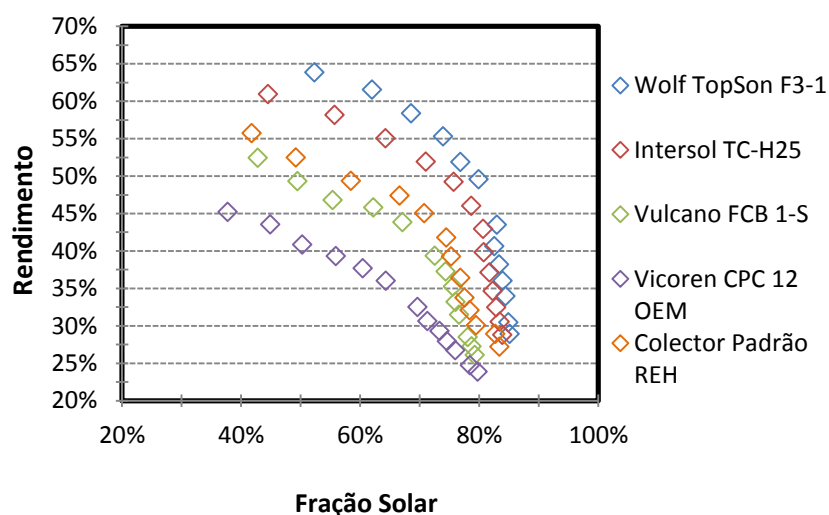


Figura 5.30 - Curvas de rendimento Vs fração solar para diferentes coletores

Assim conclui-se que *ambos os indicadores são importantes para dimensionar um sistema solar* (e para as regras periciais).

### 5.8.3 Rendimento e perdas térmicas

As Fig. 5.31 a 5.34 mostram que como esperado o rendimento diminui com o aumento de perdas térmicas e de forma aproximadamente linear.

A menor sensibilidade dessa relação é ao clima (Fig. 5.31). Ao invés, existe sensibilidade acentuada a  $T_L$  (Fig. 5.32). Realmente, enquanto os declives das relações entre índices são semelhantes em geral, isso não acontece no caso da sensibilidade à temperatura de consumo.



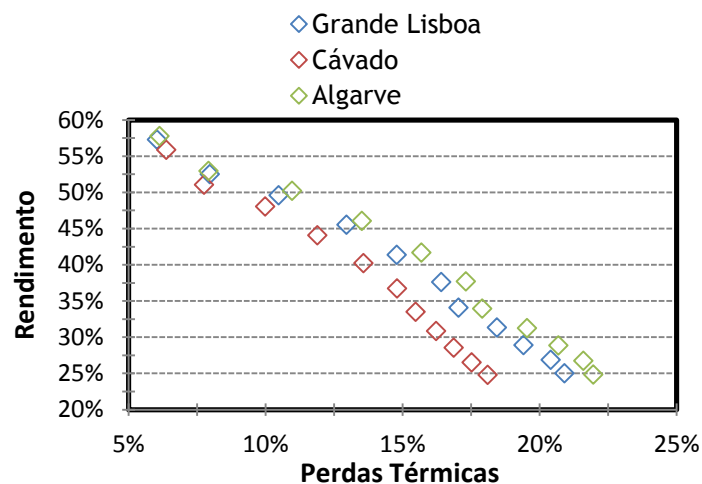


Figura 5.31 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, em 3 zonas típicas

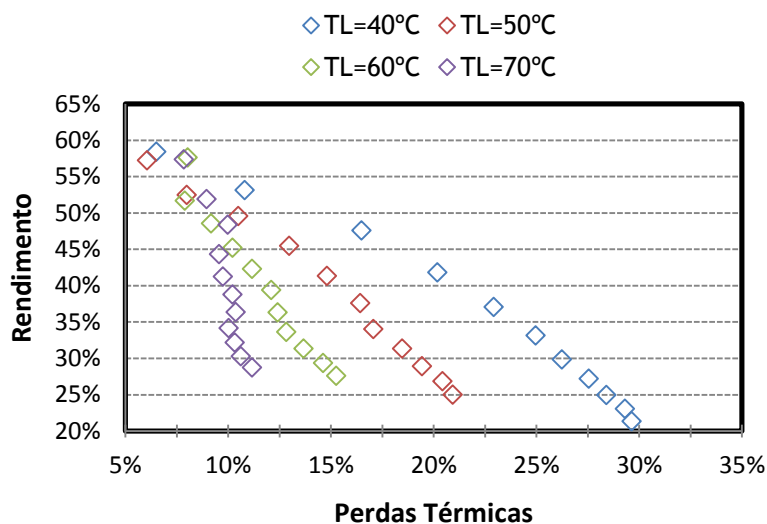


Figura 5.32 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, para diferentes  $T_L$

Note-se ainda que a relação entre perdas térmicas e rendimento é aproximadamente linear e de declive semelhante para todos os perfis de consumo, cf. Fig. 5.33.

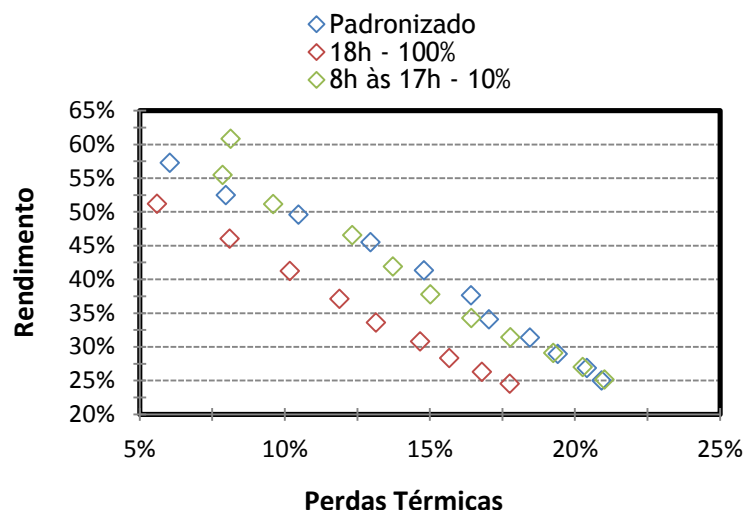


Figura 5.33 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas, para diferentes perfis de consumo

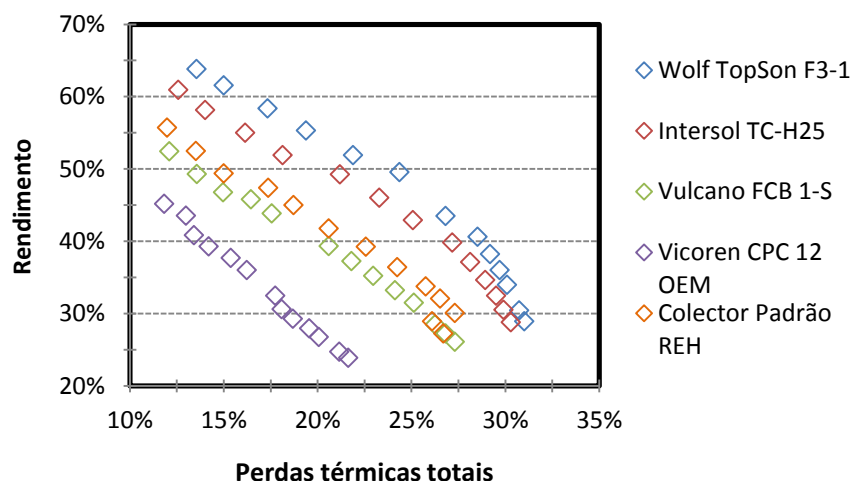


Figura 5.34 - Curvas de rendimento Vs perdas térmicas totais, de diferentes coletores

Em conclusão os indicadores rendimento e perdas térmicas não são redundantes, mas não há nenhuma regra pericial clara que se possa extrair do estudo feito.

#### 5.8.4 Produtividade e fração solar

Como já se referiu na análise das Figs. 5.24 a 5.26, pode-se considerar desprezável a influência de  $T_L$ , perfil de consumo e tipo de coletores na relação entre rendimento e produtividade. Para além disso, esta relação segue uma tendência linear, o que significa que as curvas de desempenho e respetiva análise entre  $\rho_s$  e os restantes indicadores energéticos são redundantes para  $\pi_s$ . Assim, apenas serão comentadas e analisadas as Fig. 5.35 e 5.39, referentes à influência do clima.

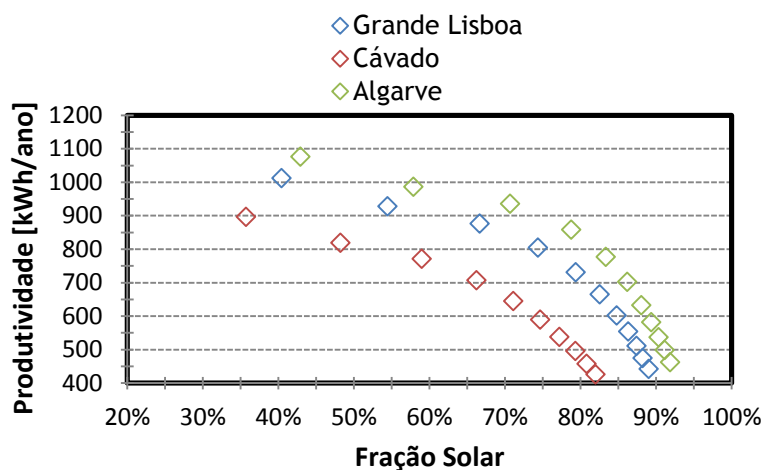
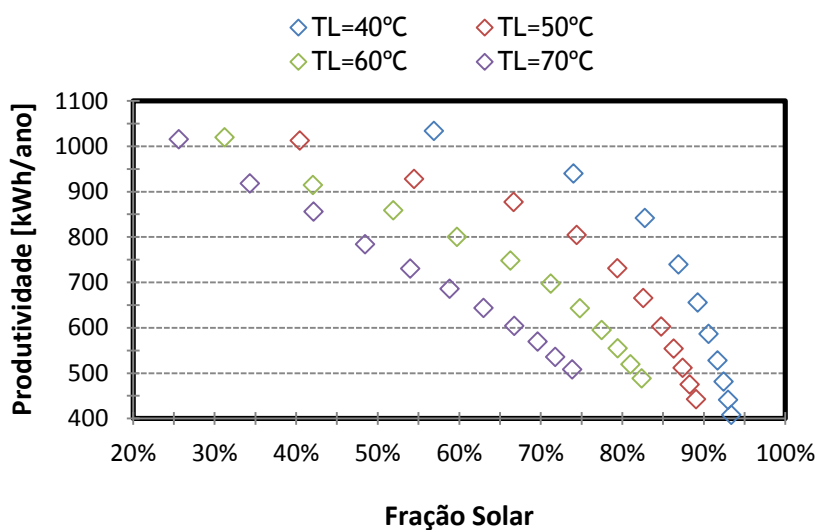


Figura 5.35 - Curvas de produtividade Vs fração solar, em 3 zonas típicas

As curvas que relacionam  $\pi_s$  com  $f_s$  (Fig. 5.35), não obstante serem do mesmo tipo, dependem de  $G_y$ , portanto do clima. Para um certo valor fixo de  $f_s$  obter-se-á maior  $\pi_s$  quanto maior for  $G_y$ . Assim, na lógica do sistema pericial, poder-se-iam definir gamas de  $\pi_s$  aceitáveis, em cada região, numa zona de  $f_s$  pretendida.

Figura 5.36 - Curvas de produtividade Vs fração solar, para diferentes  $T_L$

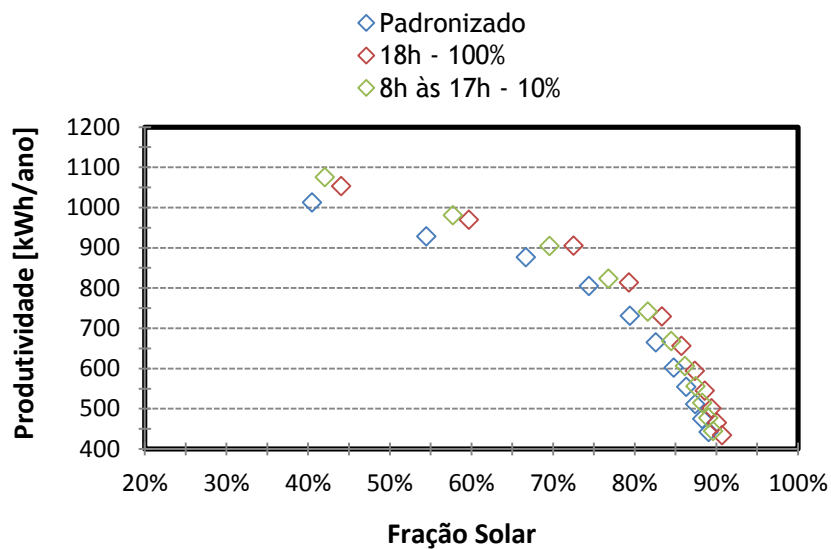


Figura 5.37 - Curvas de produtividade Vs fração solar, para diferentes perfis de consumo

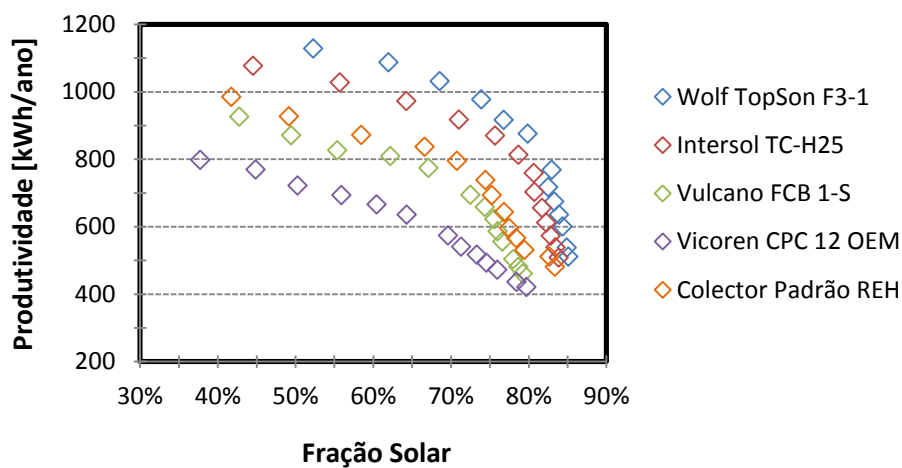


Figura 5.38 - Curvas de produtividade Vs fração solar para diferentes coletores

### 5.8.5 Produtividade e perdas térmicas

Os resultados do estudo são sumariados nas Figs. 5.39 a 5.42, e a sua análise e conclusões que se podem obter são muito semelhantes ao que foi obtido para a relação entre rendimento e perdas térmicas.

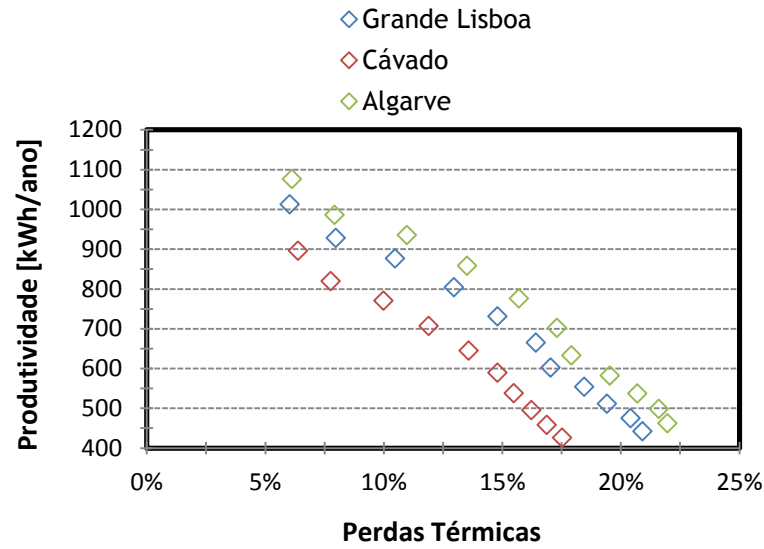


Figura 5.39 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para 3 zonas típicas

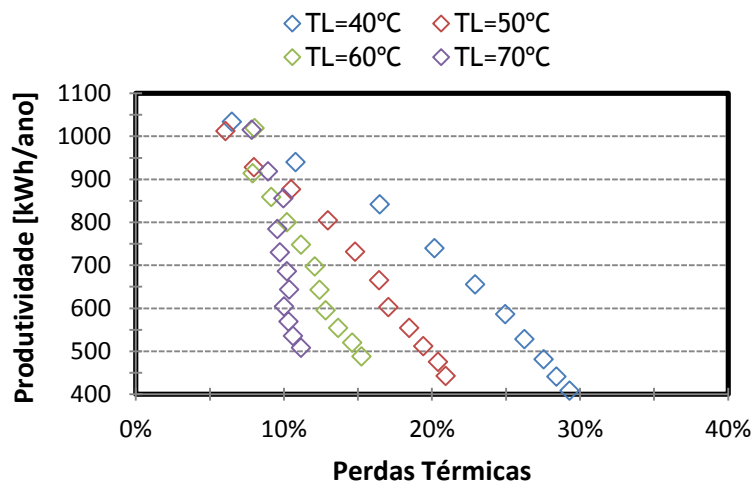


Figura 5.40 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para diferentes  $T_L$

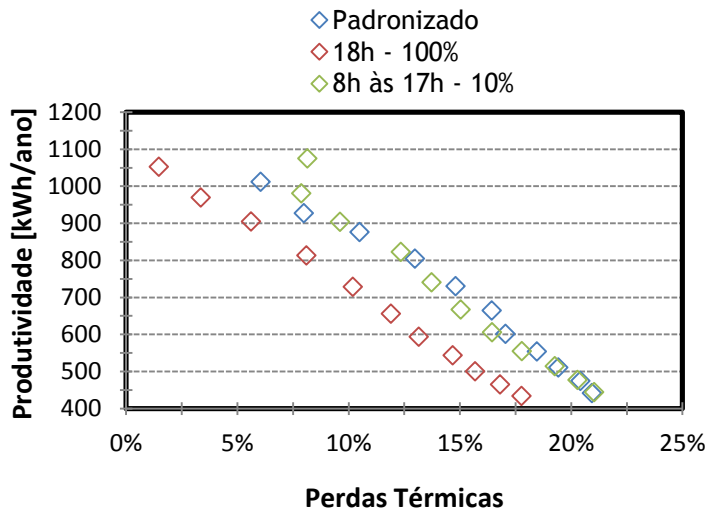


Figura 5.41 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para diferentes perfis de consumo

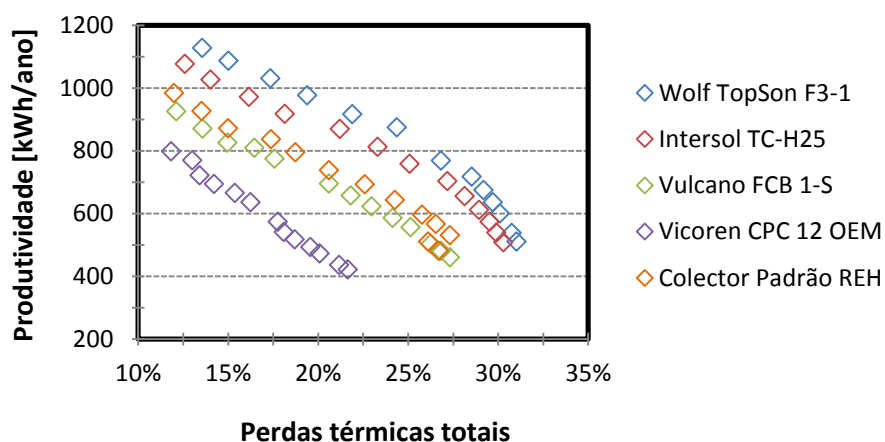


Figura 5.42 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas totais para diferentes coletores

#### 5.8.6 Fração solar e perdas térmicas

Explorou-se também a relação entre fração solar e perdas térmicas. Ambos os índices aumentam para quocientes  $A/V'$  cada vez mais elevados. Ou seja, obter maior energia de origem solar implica ter mais perdas térmicas.

No entanto a relação entre fração solar e perdas térmicas não é linear e quando  $f_s$  tende a estabilizar com o aumento de  $A/V'$ , geralmente na zona superior aos 80%, as perdas térmicas continuam a crescer. Isso significa que em princípio poderá ser desenhada uma regra pericial que detete problemas de dimensionamento *verificando se as perdas térmicas são exageradas para a fração solar obtida*.

Por isso importa aprofundar o estudo da relação entre os indicadores. Afortunadamente verifica-se que esta relação aparenta ser praticamente insensível ao tipo de coletor (Fig. 5.43), e mesmo, pouco sensível ao clima (Fig. 5.44), e a  $T_L$  (Fig. 5.45), embora neste caso haja considerável dispersão para frações solares baixas (menos de 60%).

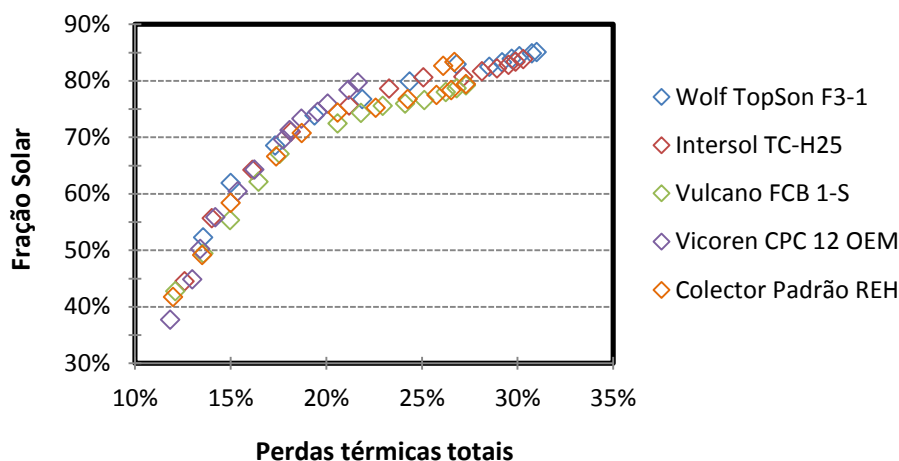


Figura 5.43 - Curvas de produtividade Vs perdas térmicas, para vários coletores comerciais.

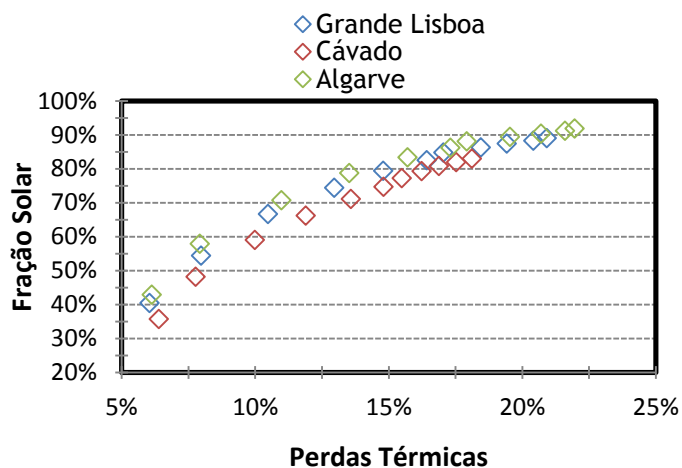


Figura 5.44 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas, para diferentes zonas climáticas.

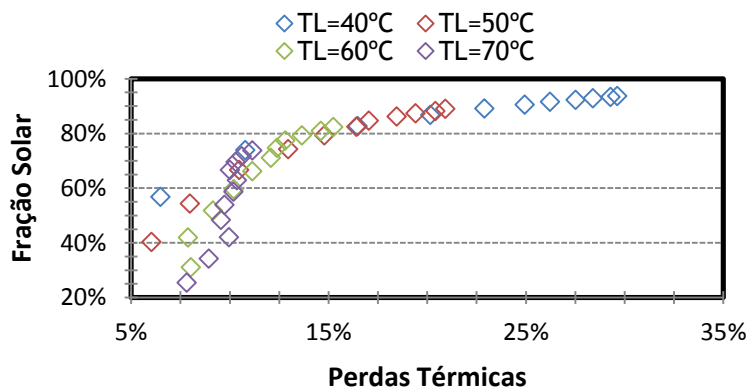


Figura 5.45 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas, para diferentes temperaturas de consumo

No entanto, esta relação é sensível ao perfil de consumo, vd. Fig. 5.46. Ainda assim, para os perfis mais realistas, os valores são próximos.

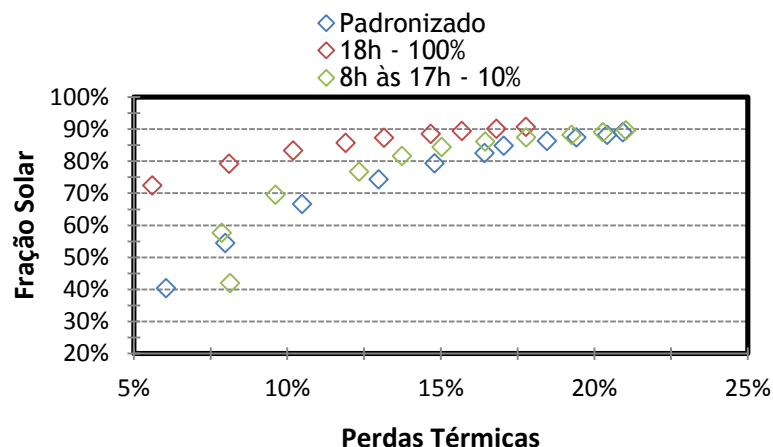


Figura 5.46 - Curvas de fração solar Vs perdas térmicas totais, para diferentes perfis de consumo.

Portanto concluímos que *deverá ser possível pré-calcular a relação fração solar vs. perdas térmicas para vários tipos de sistemas* e utilizá-la como base para uma regra pericial de verificação de bom dimensionamento.

### 5.9 Modelação dos indicadores com a razão $A/V'$

Após estes estudos exploratórios de sensibilidade, e constatando que realmente existem vários casos em que se podem construir regras periciais a partir do comportamento dos indicadores, foi retomada a questão de saber se será possível de alguma forma generalizar as relações relativas ao coletor padrão para coletores comerciais.

Em concreto a ideia seria transformar as relações entre indicadores para o caso do coletor padrão, aplicando uma transformação linear às abcissas, i.e. multiplicando  $A/V'$  por um fator de qualidade do coletor solar,  $f_{\pi}$ , que seria a razão entre a produtividade limite do coletor comercial e a produtividade limite do coletor padrão. No entanto isso exige que:

- (i) as relações tenham a mesma forma funcional para diferentes coletores
- (ii) haja um comportamento regular dos coeficientes dessas formas funcionais com  $f_{\pi}$ .

Os estudos até agora feitos sugerem visualmente que (i) é aproximadamente verdadeiro na gama de  $A/V'$  admitida, mas ignora-se que formas funcionais concretas seriam aplicáveis e se (ii) será verdadeiro.

Na Tabela 5.1 estão indicados os valores de  $f_{\pi}$  e  $\pi_{s(max)}$  de cada coletor em análise.

Tabela 5.1 - Produtividade limite de coletores comerciais e respetivo fator de qualidade

Coletor	Coletor Padrão REH	Wolf TopSon F3-1	Intersol TC-H25	Vulcano FCB 1-S	Vicoren CPC 12 OEM
$\pi_{s(max)}$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	1407	1539	1474	1356	1214
$f_{\pi}$	1,00	1,09	1,05	0,96	0,86

Inicialmente a modelação das relações foi feita em MS EXCEL. O coeficiente de determinação,  $R^2$ , foi utilizado como principal critério para escolher formas funcionais. No entanto, na larga maioria dos casos, isso corresponderia a polinómios de grau quatro ou superior (embora



podendo por vezes simplificar-se para funções parabólicas), o que tornaria a sistematização muito laboriosa. Assim procuraram-se funções alternativas que pudessem, por um lado, modelar bem o andamento das curvas (utilizou-se o critério  $R^2 \geq 0,99$ ) e por outro, que fossem mais parcimoniosas em número de coeficientes.

### 5.9.1 Sensibilidade ao clima

Observando as Fig. 5.7 e 5.8, considerou-se que os resultados poderiam ser aproximados por uma função do tipo exponencial monótona decrescente,

$$Y = Ae^{-Bx} + C \quad (5.6)$$

onde os parâmetros A, B e C são depois eventualmente dependentes do índice de qualidade do coletor, e sendo  $x$  a variável independente que corresponde a  $A/V'$ .

Iniciou-se o trabalho no *software* MS Excel, contudo não existia a função pré-definida correspondente à eq. 5.6, assim utilizou-se o *software* Grapher 9 para estes estudos. Pode ser consultado no Anexo C um exemplo de parametrização realizado por este *software*.

Nas Fig. 5.47 e 5.48 observam-se as curvas que se ajustam aos resultados obtidos no SolTerm 6, para os indicadores energéticos em estudo de cada uma das três regiões NUTS III anteriormente consideradas (Grande Lisboa, Cávado e Algarve). Como se pode constatar, a forma exponencial ajusta-se muito bem.

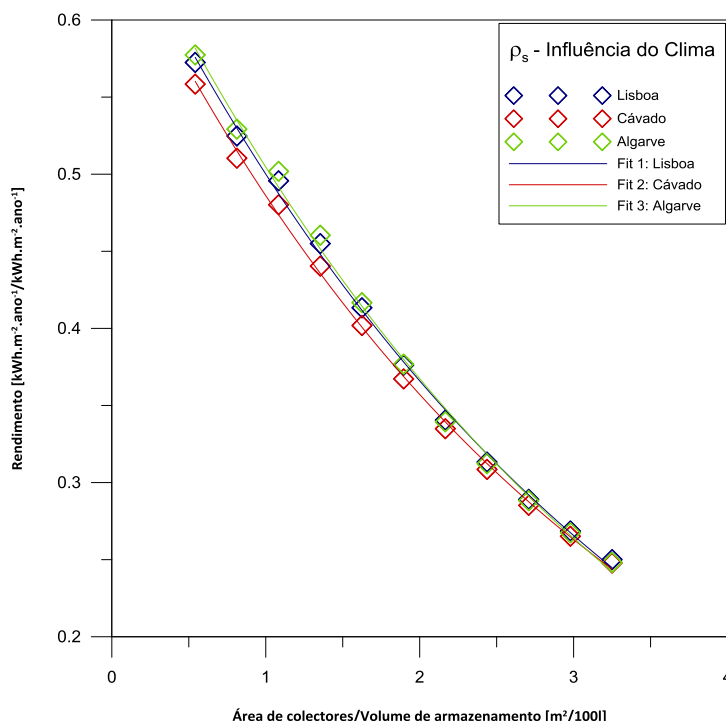


Figura 5.47 – Ajustes às curvas de rendimento, em função de  $A/V'$  - Sensibilidade ao clima

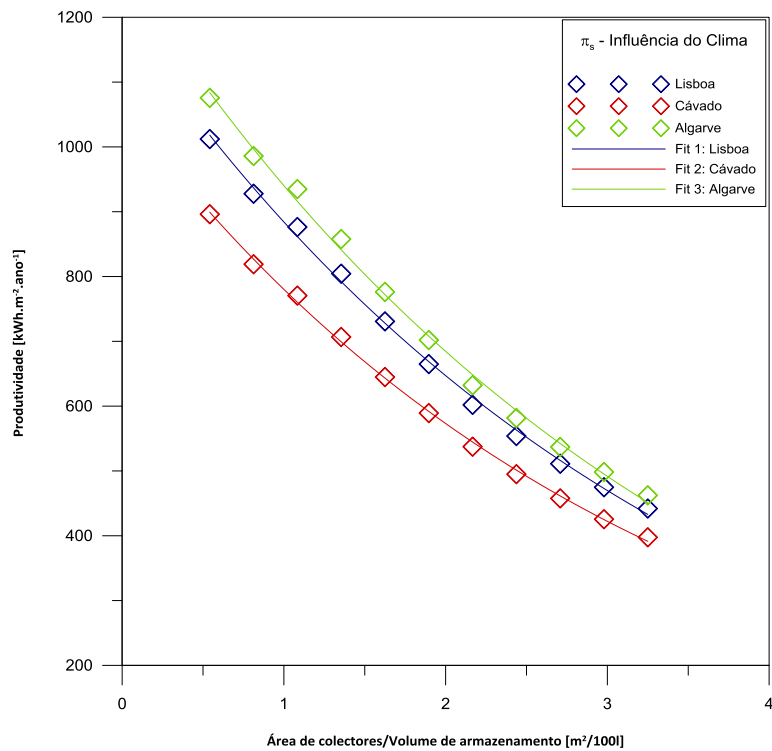


Figura 5.48 – Ajustes às curvas de produtividade, em função de A/V' - Sensibilidade ao clima

Já os resultados nas Fig. 5.6 e 5.7, não podem ser ajustadas por exponenciais na forma da equação 5.6. Assim aplicou-se primeiro uma transformação de variável nos dois casos:

$$f'_s = 1 - \frac{f_s}{100\%} \quad (5.7)$$

$$\Psi'' = 1 - \frac{\Psi}{100\%} \quad (5.8)$$

Com os bons resultados que se podem observar nas Fig. 5.49 e 5.50.

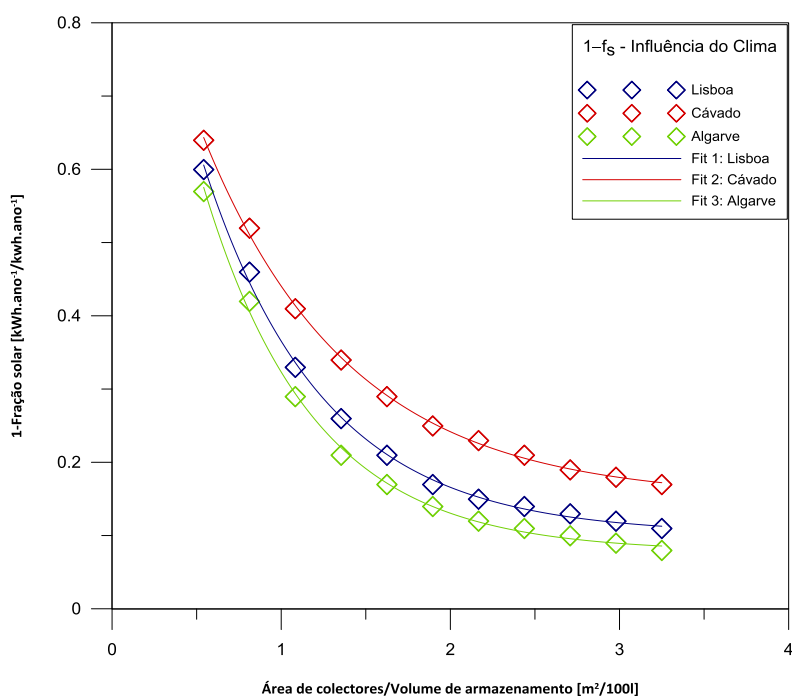


Figura 5.49 - Linhas de tendência (Fit) às curvas transformadas de fração solar, em função de  $A/V'$  - Sensibilidade ao clima

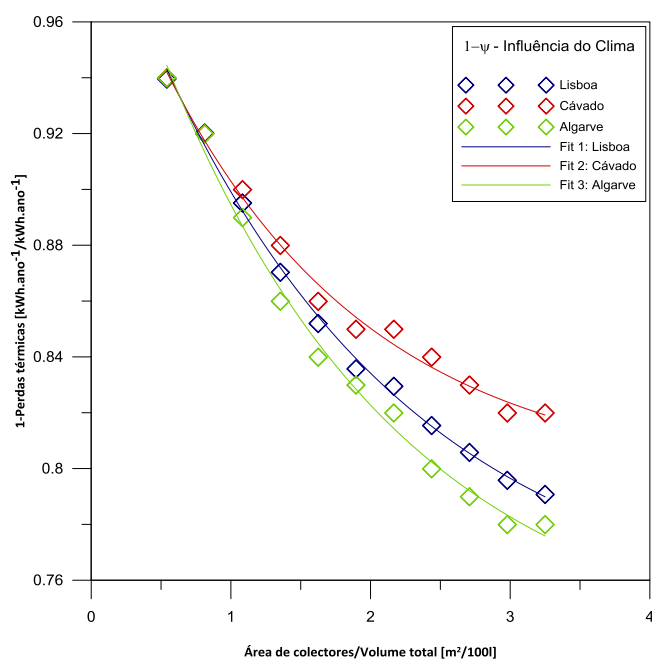


Figura 5.50 - Linhas de tendência (Fit) às curvas transformadas de perdas térmicas, em função de  $A/V'$  - Sensibilidade ao clima

Como identificado anteriormente, o rendimento energético  $\rho_s$  é muito pouco afetado pelo clima (cf. Fig. 5.47), mas para os outros indicadores há sensibilidade relevante. Assim foi necessário sistematizar os procedimentos de modelação para todas as zonas climáticas (exceto NUTS III R.A. Açores e Madeira que não foram investigadas). Por outro lado, tentou-se perceber se era importante representar melhor o clima, usando o recurso solar anual no

plano inclinado dos coletores,  $G_y$  em vez de apenas na horizontal,  $H_y$ . Na Tabela 5.2 e Figs. 5.51 a 5.53, abaixo representadas, podem-se consultar os resultados.

**Tabela 5.2 - Valores obtidos de parametrização, para o rendimento - Sensibilidade ao clima**

NUTS III	$H_y$ [kWh/m <sup>2</sup> ano]	$G_y$ [kWh/m <sup>2</sup> ano]	$T_y$ [°C]	A	B	C	R <sup>2</sup>
Minho-Lima	4,35	4,94	14,5	0,67	0,30	-0,01	0,998
Alto Trás-os-Montes	4,36	4,95	13,8	0,66	0,31	0,00	0,999
Cávado	4,39	4,96	15,0	0,65	0,32	0,01	0,999
Ave	4,40	4,97	14,5	0,66	0,30	-0,01	0,998
Tâmega	4,47	5,09	15,0	0,69	0,29	-0,02	0,998
Douro	4,47	5,10	14,9	0,69	0,31	-0,01	0,998
Entre Douro e Vouga	4,47	5,10	14,8	0,67	0,30	-0,01	0,998
Grande Porto	4,47	5,10	15,7	0,67	0,30	-0,01	0,998
Lezíria do Tejo	4,57	5,10	14,7	0,66	0,30	-0,01	0,998
Dão Lafões	4,55	5,17	14,5	0,68	0,30	-0,01	0,998
Beira Interior Norte	4,56	5,19	14,1	0,68	0,29	-0,02	0,998
Serra da Estrela	4,59	5,21	14,0	0,66	0,30	-0,01	0,998
Baixo Vouga	4,58	5,21	15,4	0,69	0,29	-0,02	0,998
Cova da Beira	4,63	5,27	15,0	0,71	0,28	-0,05	0,998
Baixo Mondego	4,64	5,28	15,6	0,69	0,29	-0,02	0,998
Pinhal Interior Norte	4,66	5,31	15,0	0,69	0,30	-0,02	0,998
Beira Interior Sul	4,68	5,34	17,4	0,73	0,30	-0,03	0,998
Pinhal Litoral	4,71	5,35	15,2	0,69	0,29	-0,03	0,998
Pinhal Interior Sul	4,72	5,37	15,5	0,73	0,30	-0,03	0,998
Médio Tejo	4,72	5,38	16,1	0,71	0,29	-0,03	0,998
Oeste	4,76	5,42	16,0	0,72	0,28	-0,05	0,997
Alto Alentejo	4,80	5,46	17,2	0,72	0,31	-0,02	0,998
Península de Setúbal	4,87	5,50	17,2	0,73	0,29	-0,04	0,997
Grande Lisboa	4,83	5,51	16,5	0,71	0,29	-0,03	0,998
Alentejo Central	4,88	5,54	17,4	0,72	0,31	-0,02	0,998
Alentejo Litoral	4,97	5,64	16,8	0,73	0,29	-0,04	0,997
Baixo Alentejo	4,98	5,67	17,8	0,75	0,28	-0,06	0,997
Algarve	5,09	5,78	17,4	0,74	0,28	-0,05	0,997

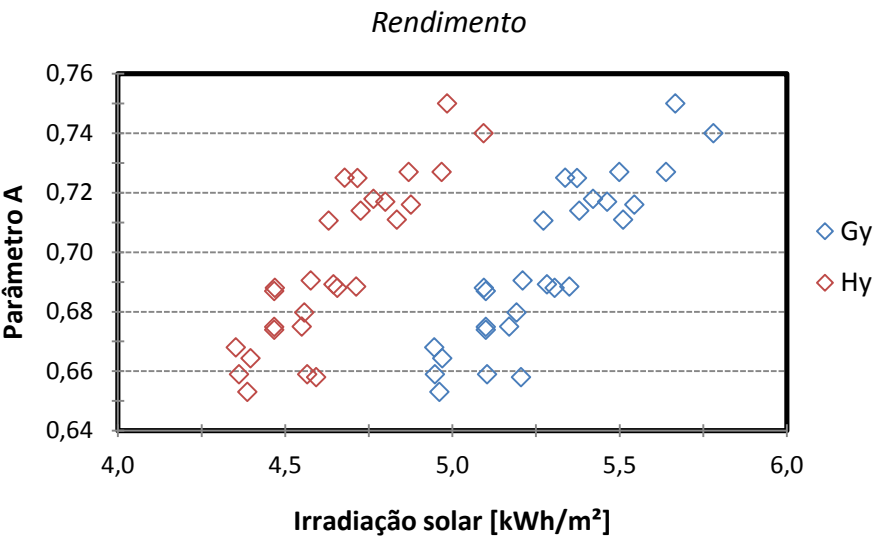


Figura 5.51 -Variação do parâmetro A do rendimento, com Hy e Gy

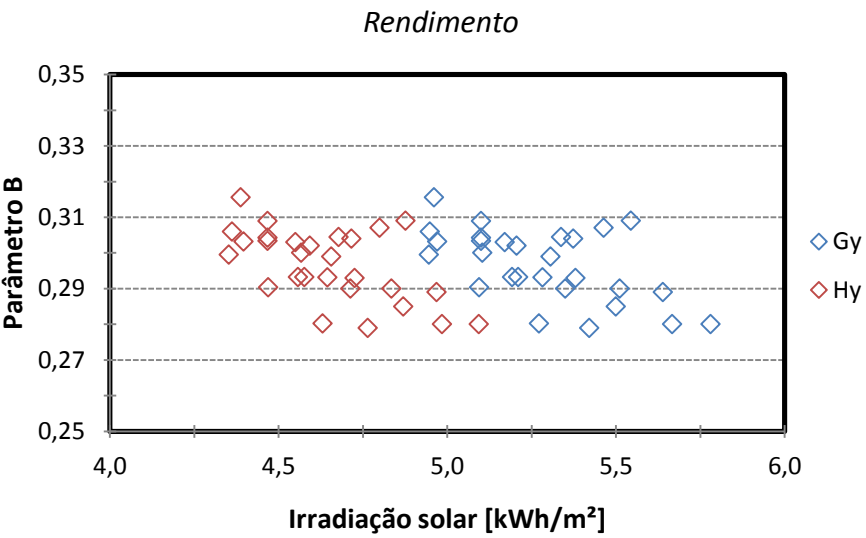


Figura 5.52 - Variação do parâmetro B do rendimento, com Hy e Gy

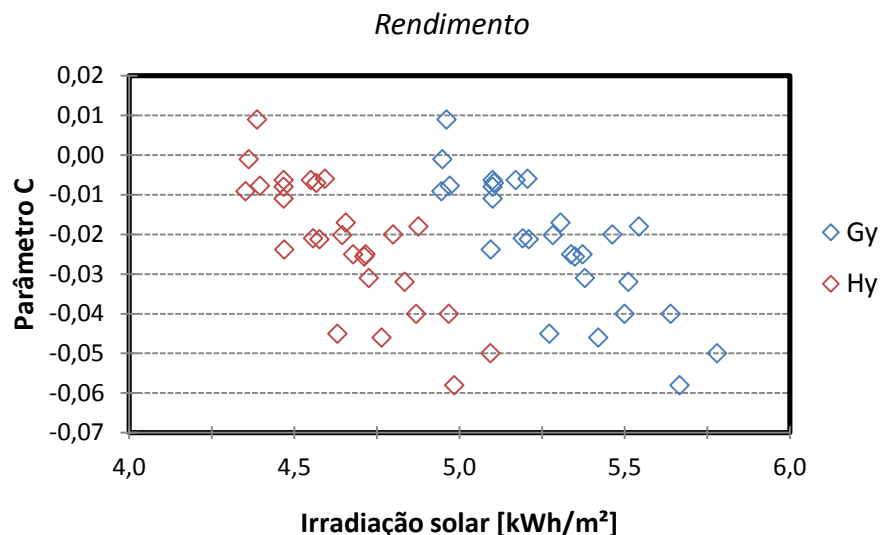


Figura 5.53 - Variação do parâmetro C do rendimento, com  $H_y$  e  $G_y$

Os coeficientes A, B, C apresentam dispersão considerável com  $H_y$  ou  $G_y$  ainda que A e C tenham (grosso modo), respetivamente, uma tendência crescente e decrescente. Nos exemplos antes estudados, observou-se que nas zonas NUTS III do Cávado, Lisboa e Algarve, os respetivos coeficientes A são superiores e os coeficientes C e B inferiores para  $H_y$  e  $G_y$  mais elevados. No entanto, se se considerarem todas as zonas NUTS III, estas inferências gerais não são rigorosas. Ao traçar curvas de ajuste os valores de A, B e C a incerteza associada a tais curvas foi elevada (com  $R^2$  nunca superiores a 0,80). Entretanto é interessante verificar que os padrões são os mesmos usando  $H_y$  ou  $G_y$ .

Para o indicador energético  $\pi_s$ , mostram-se os resultados obtidos na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores obtidos de parametrização, para a produtividade - Sensibilidade ao clima

NUTS III	$H_y$ [kWh/m²ano]	$G_y$ [kWh/m²ano]	$T_y$ [°C]	A	B	C	$R^2$
Minho-Lima	4,35	4,94	14,5	0,94	1,21	0,16	0,999
Alto Trás-os-Montes	4,36	4,95	13,8	0,93	1,20	0,17	0,999
Cávado	4,39	4,96	15,0	0,92	1,16	0,15	0,999
Ave	4,40	4,97	14,5	0,94	1,22	0,17	0,999
Tâmega	4,47	5,09	15,0	0,97	1,25	0,14	0,999
Douro	4,47	5,10	14,9	0,95	1,28	0,16	0,999
Entre Douro e Vouga	4,47	5,10	14,8	0,97	1,26	0,14	0,999
Grande Porto	4,47	5,10	15,7	0,97	1,24	0,14	0,999
Lezíria do Tejo	4,57	5,10	14,7	0,97	1,25	0,14	0,999
Dão Lafões	4,55	5,17	14,5	0,97	1,28	0,15	0,999
Beira Interior Norte	4,56	5,19	14,1	0,97	1,25	0,14	0,999
Serra da Estrela	4,59	5,21	14,0	0,97	1,24	0,14	0,999
Baixo Vouga	4,58	5,21	15,4	1,01	1,30	0,13	0,999

Cova da Beira	4,63	5,27	15,0	1,00	1,30	0,13	0,999
Baixo Mondego	4,64	5,28	15,6	1,02	1,30	0,12	0,999
Pinhal Interior Norte	4,66	5,31	15,0	1,00	1,31	0,13	0,999
Beira Interior Sul	4,68	5,34	17,4	1,03	1,39	0,12	0,999
Pinhal Litoral	4,71	5,35	15,2	1,01	1,28	0,11	0,999
Pinhal Interior Sul	4,72	5,37	15,5	1,02	1,33	0,11	0,999
Médio Tejo	4,72	5,38	16,1	1,03	1,37	0,12	0,999
Oeste	4,76	5,42	16,0	1,04	1,36	0,11	0,999
Alto Alentejo	4,80	5,46	17,2	1,04	1,42	0,11	0,999
Península de Setúbal	4,87	5,50	17,2	1,08	1,43	0,10	0,999
Grande Lisboa	4,83	5,51	16,5	1,08	1,41	0,10	0,999
Alentejo Central	4,88	5,54	17,4	1,06	1,42	0,10	0,999
Alentejo Litoral	4,97	5,64	16,8	1,09	1,47	0,09	0,999
Baixo Alentejo	4,98	5,67	17,8	1,12	1,54	0,09	0,999
Algarve	5,09	5,78	17,4	1,15	1,54	0,08	0,998

Em cada zona NUTS III, os parâmetros B de  $\pi_s$  e  $\rho_s$  são aproximadamente iguais (arredondados às centésimas), i.e., as respetivas curvas apresentam idêntico decaimento, o que tem que ver com a relação linear entre estes indicadores energéticos (Fig. 5.23).

Na Tabela 5.4, apresentam-se os resultados de parametrização para a função transformada  $f'_s$ .

**Tabela 5.4 - Valores obtidos de parametrização, para a transformada da fração solar - Sensibilidade ao clima**

NUTS III	$H_y$ [kWh/m <sup>2</sup> ano]	$G_y$ [kWh/m <sup>2</sup> ano]	$T_y$ [°C]	A	B	C	R <sup>2</sup>
Minho-Lima	4,35	4,94	14,5	1064	0,30	-14,61	0,998
Alto Trás-os-Montes	4,36	4,95	13,8	1052	0,31	-3,06	0,999
Cávado	4,39	4,96	15,0	1048	0,32	15,66	0,999
Ave	4,40	4,97	14,5	1068	0,30	-12,50	0,998
Tâmega	4,47	5,09	15,0	1125	0,29	-38,98	0,998
Douro	4,47	5,10	14,9	1123	0,31	-18,37	0,998
Entre Douro e Vouga	4,47	5,10	14,8	1116	0,30	-20,98	0,998
Grande Porto	4,47	5,10	15,7	1105	0,30	-10,45	0,998
Lezíria do Tejo	4,57	5,10	14,7	1102	0,30	-12,15	0,998
Dão Lafões	4,55	5,17	14,5	1125	0,30	-17,96	0,998
Beira Interior Norte	4,56	5,19	14,1	1133	0,29	-35,72	0,998
Serra da Estrela	4,59	5,21	14,0	1106	0,30	-10,59	0,998
Baixo Vouga	4,58	5,21	15,4	1157	0,29	-35,51	0,998
Cova da Beira	4,63	5,27	15,0	1183	0,29	-54,20	0,998
Baixo Mondego	4,64	5,28	15,6	1171	0,29	-34,47	0,998
Pinhal Interior Norte	4,66	5,31	15,0	1172	0,30	-29,46	0,998
Beira Interior Sul	4,68	5,34	17,4	1241	0,30	-42,85	0,998
Pinhal Litoral	4,71	5,35	15,2	1187	0,29	-44,30	0,998
Pinhal Interior Sul	4,72	5,37	15,5	1241	0,30	-42,85	0,998

Médio Tejo	4,72	5,38	16,1	1235	0,29	-54,56	0,998
Oeste	4,76	5,42	16,0	1232	0,29	-59,43	0,997
Alto Alentejo	4,80	5,46	17,2	1260	0,31	-37,92	0,998
Península de Setúbal	4,87	5,50	17,2	1296	0,29	-79,79	0,997
Grande Lisboa	4,83	5,51	16,5	1258	0,29	-56,46	0,998
Alentejo Central	4,88	5,54	17,4	1278	0,31	-79,79	0,998
Alentejo Litoral	4,97	5,64	16,8	1322	0,29	-75,69	0,997
Baixo Alentejo	4,98	5,67	17,8	1384	0,28	-107,50	0,997
Algarve	5,09	5,78	17,4	1379	0,28	-99,55	0,997

Sendo  $f_s$ , o indicador energético mais importante e naturalmente com dependência significativa do recurso solar disponível, tentou-se parametrizar a variação das constantes A, B e C em função de  $G_y$ , procurando, se possível, encontrar para cada região NUTS III, um limite superior de  $f_s$ , a partir do qual o sistema solar térmico já apresente maus desempenhos energéticos (perdas térmicas muito elevadas e baixo rendimento).

Apesar da tendência nitidamente crescente para os parâmetros A e B, e decrescente para o parâmetro C, em função do aumento quer de  $G_y$  ou de  $H_y$  (indicativos de cada região NUTS III), como se pode verificar nas Figs. 5.54 a 5.56 ainda existe uma certa dispersão. A inclusão de outros fatores, como por exemplo  $T_y$ , poderá tornar os resultados melhores.

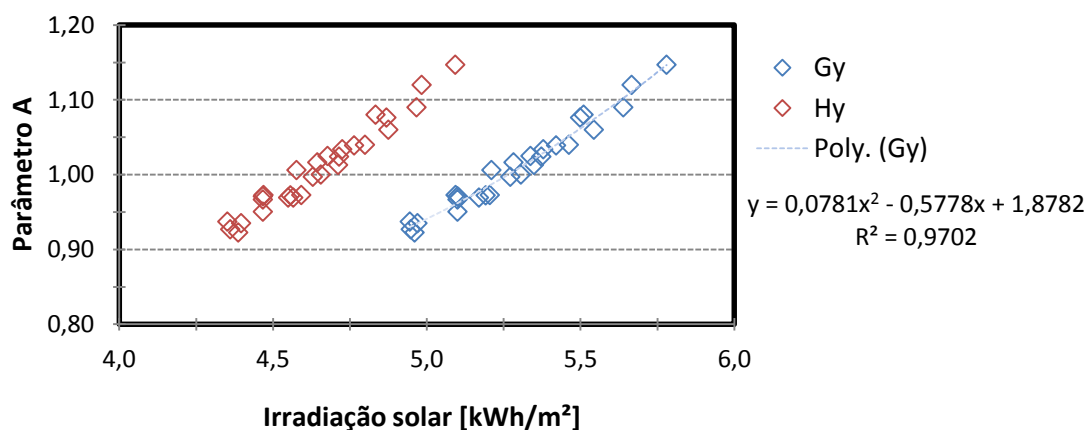


Figura 5.54 - Variação do parâmetro A da transformada da fração solar, com  $H_y$  e  $G_y$



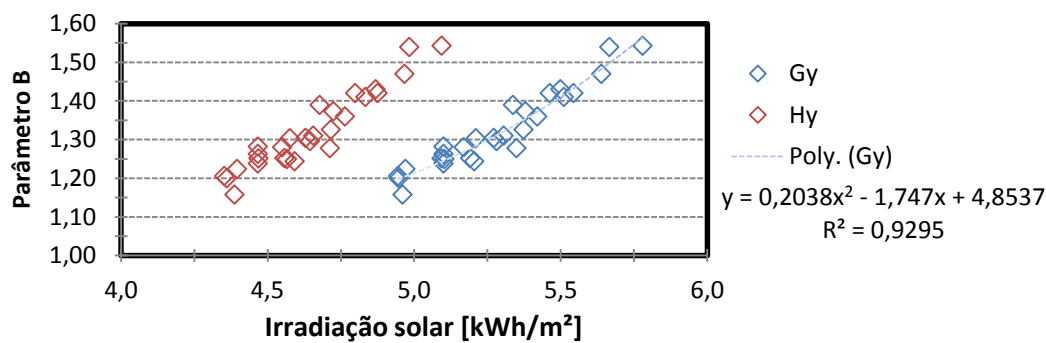


Figura 5.55 - Variação do parâmetro B da transformada da fração solar, com Hy e Gy

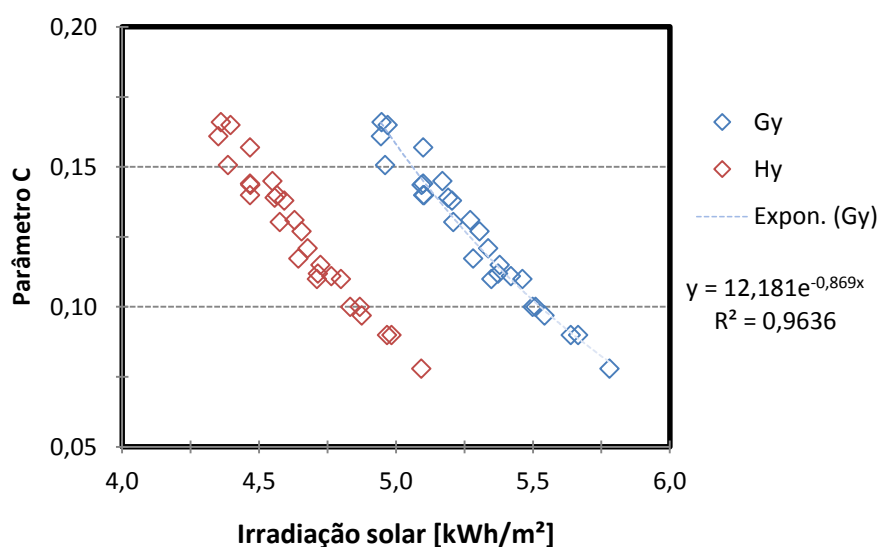


Figura 5.56 - Variação do parâmetro C da transformada da fração solar, com Hy e Gy

Na Tabela 5.5, apresentam-se os resultados de parametrização para a função transformada  $\psi''$ , também bastante satisfatórios. Os gráficos com as curvas de ajuste foram mostrados como exemplo na subsecção anterior, por questões de espaço a partir daqui os resultados aparecerão apenas em tabelas.

Tabela 5.5 - Valores obtidos de parametrização, para a transformada das perdas térmicas - Sensibilidade ao clima

NUTS III	$H_y$ [kWh/m²ano]	$G_y$ [kWh/m²ano]	$T_y$ [°C]	A	B	C	$R^2$
Minho-Lima	4,35	4,94	14,5	0,21	0,61	0,79	0,994
Alto Trás-os-Montes	4,36	4,95	13,8	0,21	0,62	0,79	0,996
Cávado	4,39	4,96	15,0	0,21	0,68	0,80	0,992
Ave	4,40	4,97	14,5	0,21	0,62	0,79	0,996
Tâmega	4,47	5,09	15,0	0,22	0,60	0,78	0,994
Douro	4,47	5,10	14,9	0,23	0,74	0,79	0,996
Entre Douro e Vouga	4,47	5,10	14,8	0,23	0,55	0,77	0,998
Grande Porto	4,47	5,10	15,7	0,23	0,58	0,78	0,998

Lezíria do Tejo	4,57	5,10	14,7	0,23	0,55	0,77	0,996
Dão Lafões	4,55	5,17	14,5	0,24	0,62	0,78	0,996
Beira Interior Norte	4,56	5,19	14,1	0,23	0,65	0,78	0,996
Serra da Estrela	4,59	5,21	14,0	0,23	0,55	0,77	0,997
Baixo Vouga	4,58	5,21	15,4	0,24	0,51	0,76	0,993
Cova da Beira	4,63	5,27	15,0	0,24	0,61	0,77	0,994
Baixo Mondego	4,64	5,28	15,6	0,25	0,53	0,76	0,997
Pinhal Interior Norte	4,66	5,31	15,0	0,24	0,60	0,77	0,996
Beira Interior Sul	4,68	5,34	17,4	0,25	0,71	0,77	0,994
Pinhal Litoral	4,71	5,35	15,2	0,24	0,62	0,77	0,997
Pinhal Interior Sul	4,72	5,37	15,5	0,24	0,60	0,77	0,994
Médio Tejo	4,72	5,38	16,1	0,26	0,64	0,76	0,997
Oeste	4,76	5,42	16,0	0,26	0,59	0,76	0,996
Alto Alentejo	4,80	5,46	17,2	0,26	0,68	0,76	0,997
Península de Setúbal	4,87	5,50	17,2	0,26	0,60	0,75	0,996
Grande Lisboa	4,83	5,51	16,5	0,27	0,54	0,74	0,997
Alentejo Central	4,88	5,54	17,4	0,26	0,67	0,76	0,997
Alentejo Litoral	4,97	5,64	16,8	0,28	0,62	0,75	0,998
Baixo Alentejo	4,98	5,67	17,8	0,29	0,71	0,75	0,995
Algarve	5,09	5,78	17,4	0,29	0,58	0,73	0,994

Na parametrizações dos coeficientes das curvas relativas à fração solar através de  $G_y$ , os coeficientes  $R^2$  obtidos foram sempre superiores a 0,99, o que mostra que as curvas de sensibilidade para região NUTS III de Portugal Continental, em função de  $A/V'$ , podem ser aproximadas à curva de ajuste da equação 5.6.

### 5.9.2 Sensibilidade à temperatura de consumo

Para os restantes estudos de sensibilidade e respetivas modelações, foi utilizada a mesma metodologia, i.e., efetuaram-se as transformadas de  $f_s$  e  $\psi$  de acordo com as equações 5.7 e 5.8, de modo a que todas as curvas de ajuste sigam a equação 5.6. Os resultados de parametrização referentes à sensibilidade da  $T_L$ , podem ser consultados na Tabela 5.6 e 5.7. Por uma questão de melhor legibilidade dos resultados, neste e nos estudos seguintes foram utilizadas duas tabelas.

**Tabela 5.6 - Resultados de parametrização – Sensibilidade a  $T_L$**

Zona NUTS III	Grande Lisboa			
Parâmetro	A			
$T_L$ [°C]	40	50	60	70
$\rho_s$	0,67	0,71	0,59	0,50
$\pi_s$	1183	1258	1048	889
$f'_s$	1,20	1,07	0,93	0,84
$\Psi'''$	0,43	0,27	0,46	0,45
Parâmetro	B			

$T_L$ [°C]	40	50	60	70
$\rho_s$	0,53	0,29	0,33	0,48
$\pi_s$	0,53	0,29	0,33	0,48
$f'_s$	2,23	1,39	0,89	0,58
$\Psi''$	0,97	0,54	0,07	0,02
Parâmetro	C			
$T_L$ [°C]	40	50	60	70
$\rho_s$	0,09	-0,03	0,07	0,18
$\pi_s$	158,86	-56,46	131,54	322,49
$f'_s$	0,07	0,10	0,12	0,13
$\Psi''$	0,68	0,74	0,48	0,48

**Tabela 5.7 - Coeficientes de determinação para cada  $T_L$  e indicador energético - Sensibilidade a  $T_L$** 

Zona NUTS III	Grande Lisboa			
Coeficiente de determinação	$R^2$			
$T_L$ [°C]	40°C	50°C	60°C	70°C
$\rho_s$	0,999	0,998	0,998	0,999
$\pi_s$	0,999	0,998	0,998	0,999
$f'_s$	0,998	0,999	0,999	0,999
$\Psi''$	0,997	0,997	0,985	0,773

No seguimento da observação da Tabela 5.7, conclui-se que as curvas de desempenho energético, ajustam-se bem à curva de equação 5.6, com exceção de  $\Psi''$  para  $T_L$  de 60°C e 70°C, cujos valores de  $R^2$  são inferiores ao mínimo admitido. No entanto, a variação dos parâmetros A, B e C em função de  $T_L$  resultaram apenas em curvas de ajuste do tipo polinomial do 3º grau (ou superior), seguindo o critério de  $R^2 \geq 0,99$ . Contudo, um estudo onde só constam 4 pontos (4 valores de  $T_L$ ) é manifestamente escasso para se construírem regras periciais com base nestas parametrizações. Ainda assim, a partir das regularidades apresentadas nos estudos exploratórios (ver Fig. 5.11 a 5.14), crê-se ser possível construir regras periciais úteis (ver mais à frente).

### 5.9.3 Sensibilidade ao perfil de consumo

As Tabelas 5.8 e 5.9, mostram os resultados de parametrização relativamente ao estudo de sensibilidade do perfil de consumo.

**Tabela 5.8 - Resultados de parametrização - Sensibilidade ao perfil de consumo**

Zona NUTS III	Grande Lisboa		
Parâmetro	A		
Perfil de Consumo	Padronizado	18h - 100%	8h às 17h - 10%

$\rho_s$	0,71	0,70	0,69
$\pi_s$	1258	1242	1212
$f'_s$	1,07	1,17	1,13
$\Psi''$	0,27	0,32	0,48
Parâmetro	B		
Perfil de Consumo	Padronizado	18h - 100%	8h às 17h - 10%
$\rho_s$	0,29	0,37	0,40
$\pi_s$	0,29	0,37	0,40
$f'_s$	1,39	1,68	1,56
$\Psi''$	0,54	0,40	0,14
Parâmetro	C		
Perfil de Consumo	Padronizado	18h - 100%	8h às 17h - 10%
$\rho_s$	-0,03	0,03	0,06
$\pi_s$	-56,46	50,59	107,32
$f'_s$	0,10	0,09	0,10
$\Psi''$	0,74	0,73	0,48

**Tabela 5.9 - Coeficientes de determinação para cada indicador energético - Sensibilidade ao perfil de consumo**

Zona NUTS III	Grande Lisboa		
Coeficiente de determinação	R <sup>2</sup>		
Perfil de Consumo	Padronizado	18h - 100%	8h às 17h - 10%
$\rho_s$	0,998	0,997	0,999
$\pi_s$	0,998	0,997	0,999
$f'_s$	0,999	0,999	0,999
$\Psi''$	0,997	0,998	0,987

#### 5.9.4 Generalização para coletores comerciais

No que diz respeito ao estudo de sensibilidade de coletores comerciais (ver Fig.5.19 a 5.22), foi revisitada a hipótese enunciada no início da presente secção, nomeadamente o ajuste das curvas relativas a estudos com o coletor padrão, através de um fator de qualidade do coletor,  $f_{\pi}$ . Isto com a exceção da produtividade, uma vez que se concluiu dos estudos anteriores ser redundante com o rendimento.

O critério de comparação utilizado segue a equação mostrada abaixo:

$$\Delta R = |R_i - f_{\pi i} R_{REH}| \times 100\% \quad (5.9)$$

Em que  $\Delta R$ , é o módulo da variação (em percentagem) entre o valor do indicador energético ( $R_i$ ) do coletor  $i$  e o valor da multiplicação do mesmo indicador energético mas referente ao coletor padrão ( $R_{REH}$ ) com o fator  $f_{\pi i}$ , característico do coletor  $i$ . De notar que cada iteração pode corresponder a valores de  $A/V'$  ligeiramente distintos entre si (por resultarem de coletores diferentes), mas o primeiro ponto  $A/V'$  de um coletor  $i$  será comparado com o primeiro ponto do coletor padrão e assim sucessivamente até perfazer os 13 valores da gama  $A/V'$  admitidos.

Os resultados podem ser consultados na Tabela 5.10.

**Tabela 5.10 - Resultados da hipótese testada para coletores comerciais com o fator de produtividade limite característico de cada um**

Coletor REH	Wolf TopSon F3-1				Intersol TC-H25				Vulcano FCB 1-S				Vicoren CPC 12 OEM			
$A/V'$	$\Delta\rho_s$	$\Delta f_s$	$\Delta\psi'$	$A/V'$	$\Delta\rho_s$	$\Delta f_s$	$\Delta\psi'$	$A/V'$	$\Delta\rho_s$	$\Delta f_s$	$\Delta\psi'$	$A/V'$	$\Delta\rho_s$	$\Delta f_s$	$\Delta\psi'$	$A/V'$
0,60	0%	7%	3%	0,66	0%	1%	3%	0,59	1%	3%	1%	0,65	3%	2%	1%	0,66
0,76	0%	8%	4%	0,83	0%	4%	3%	0,78	1%	2%	1%	0,81	2%	2%	1%	0,82
0,98	1%	5%	4%	1,00	0%	3%	3%	0,98	1%	1%	1%	0,98	2%	0%	0%	0,99
1,19	0%	1%	3%	1,16	0%	1%	2%	1,17	0%	2%	0%	1,14	2%	2%	1%	1,15
1,35	1%	1%	3%	1,33	2%	2%	2%	1,37	0%	1%	0%	1,30	1%	1%	1%	1,32
1,57	2%	2%	4%	1,49	2%	1%	2%	1,56	1%	1%	1%	1,63	0%	0%	2%	1,48
1,73	2%	1%	1%	1,82	1%	2%	2%	1,76	1%	2%	0%	1,79	1%	5%	2%	1,81
1,95	2%	2%	1%	1,99	2%	0%	2%	1,95	0%	2%	0%	1,95	1%	5%	3%	1,97
2,17	1%	1%	1%	2,16	1%	1%	2%	2,15	1%	1%	1%	2,11	0%	6%	4%	2,14
2,33	1%	2%	1%	2,32	1%	0%	1%	2,34	1%	1%	0%	2,28	0%	7%	3%	2,30
2,55	0%	3%	1%	2,49	1%	0%	1%	2,54	0%	1%	0%	2,60	1%	7%	3%	2,47
2,71	2%	6%	1%	2,82	3%	3%	0%	2,73	1%	1%	2%	2,76	0%	7%	1%	2,80
2,93	2%	6%	1%	2,99	2%	3%	0%	2,93	0%	1%	2%	2,93	0%	8%	1%	2,96

Para que se possa generalizar o comportamento das curvas de desempenho energético dos vários coletores comerciais, partindo dos respetivos fatores  $f_{\pi}$  que lhes são característicos e do comportamento do coletor padrão REH, os valores da equação 5.9 em cada indicador energético (desvios) deverão ser muito pequenos em tantos pontos  $A/V'$  quanto possível. Segundo este critério, o indicador energético que cumpre melhor é  $\rho_s$  (devido à redundância com  $\pi_s$ ). Para valores baixos de  $A/V'$  (tipicamente até 1,20 m<sup>2</sup>/100 l), nos coletores planos testados, o comportamento da curva parametrizada ( $f_{\pi i} \rho_{s(REH)}$ ) é similar à curva  $\rho_{s(i)}$  (variação máxima de 1%). Para valores superiores de  $A/V'$ , as diferenças entre as curvas variam tipicamente entre os 1 e os 2%, com alguns pontos (zona de estabilização da curva) em que os desvios podem chegar aos 3% (coletores Intersol TC-H25 e Vicoren CPC 12 OEM). Ao invés, no caso do coletor CPC verificam-se valores de  $\Delta\rho_s$  na ordem dos 2% para zonas de sob dimensionamento de  $A/V'$  (inferior a 1,20 m<sup>2</sup>/100l) e valores entre os 0 e 1% para a restante gama  $A/V'$ . Nos 4 coletores, a semelhança encontrada entre as duas curvas de  $\rho_s$  testadas poderá ser explicada pela relação entre o indicador  $\pi_s$  (que é redundante com  $\rho_s$ ) e  $\pi_{s(max)}$ .

Nos indicadores  $f_s$  e  $\psi'$  a variação entre as curvas testadas pela equação 5.9 é maior, com destaque para  $\Delta f_s$ , nos coletores Wolf TopSon F3-1 e Vicoren CPC 12 OEM onde os desvios podem ser superiores a 5% em zonas de sob e sobredimensionamento do sistema no primeiro caso e de sobredimensionamento no segundo.

Conclui-se que (infelizmente) as curvas desempenho de  $f_s$  e  $\psi'$  *não podem* ser generalizadas para quaisquer coletores comerciais a partir de  $\pi_{s(max)}$ . Isso pode contudo ser possível em certos coletores (por exemplo o Vulcano FCB 1-S apresenta variações nas curvas de  $f_s$  entre 1% e 2% e variações entre 0% a 1% nas curvas de  $\psi'$ , na maioria dos pontos A/V').

Ao analisar e comparar os resultados entre o mesmo indicador energético verifica-se que não existe um padrão de variação definido entre coletores comerciais. O facto de cada coletor ter pontos A/V' distintos (por ter  $A_a$  diferente) na maioria da gama admitida, crê-se não estar a influenciar a análise. De facto, nos pontos A/V' coincidentes os resultados entre coletores foram diferentes, daí que o maior relevo dessa diferença possa estar apenas relacionada com as características térmicas de cada coletor, onde o fator  $f_\pi$  é apenas mais um a considerar. Ainda assim, a tendência de variação é mais díspar se se separar de um lado os coletores planos e o coletor CPC do outro. Em suma, os resultados da Tabela 5.10 permitem afirmar que é possível construir regras periciais (ver à frente) a partir da equação 5.9 para os indicadores energéticos  $\pi_s$  e  $\rho_s$  em coletores solares planos. Já no caso de coletores CPC, são necessários estudos mais aprofundados.

Uma vez testada a hipótese enunciada e restringidas as condições onde pode ser aplicada, modelaram-se as curvas de desempenho energético pela mesma metodologia dos estudos de sensibilidade anteriores. As Tabelas 5.11 e 5.12, mostram os resultados de parametrização relativamente ao estudo de sensibilidade de coletores comerciais.

**Tabela 5.11 - Resultados de parametrização - Sensibilidade à utilização de diferentes coletores comerciais**

Parâmetro	A				
Tipo de Coletor	Coletor Padrão REH	Wolf TopSon F3-1	Intersol TC-H25	Vulcano FCB 1-S	Vicoren CPC 12 OEM
$\rho_s$	0,75	0,91	1,01	0,74	0,50
$\pi_s$	1333	1605	1783	1315	889
$f'_s$	1,02	1,35	1,22	1,05	0,90
$1-\psi'$	0,31	0,39	0,37	0,33	0,25
Parâmetro	B				
Tipo de Coletor	Coletor Padrão REH	Wolf TopSon F3-1	Intersol TC-H25	Vulcano FCB 1-S	Vicoren CPC 12 OEM
$\rho_s$	0,25	0,28	0,20	0,24	0,34
$\pi_s$	0,25	0,28	0,20	0,24	0,34
$f'_s$	1,50	2,13	1,90	1,55	1,02
$1-\psi'$	0,62	0,88	0,63	0,46	0,28
Parâmetro	C				
Tipo de Coletor	Coletor Padrão REH	Wolf TopSon F3-1	Intersol TC-H25	Vulcano FCB 1-S	Vicoren CPC 12 OEM
$\rho_s$	-0,09	-0,10	-0,28	-0,12	0,05
$\pi_s$	-162	-185	-501	-206	93

$f'_s$	0,17	0,15	0,16	0,20	0,16
$1-\psi'$	0,67	0,65	0,63	0,64	0,67

**Tabela 5.12 - Coeficientes de determinação para cada coletor e indicador energético – Coletores comerciais**

Zona NUTS III	Grande Lisboa				
Coeficiente de determinação	$R^2$				
Tipo de coletor	Coletor Padrão REH	Wolf TopSon F3-1	Intersol TC-H25	Vulcano FCB 1-S	Vicoren CPC 12 OEM
$\rho_s$	0,997	0,998	0,999	0,998	0,999
$\pi_s$	0,997	0,998	0,999	0,998	0,999
$f'_s$	0,992	0,999	0,998	0,996	0,999
$1-\psi'$	0,978	0,990	0,987	0,997	0,997

Da análise das Tabelas 5.11 e 5.12, verifica-se que não existe qualquer tendência definida entre os parâmetros A, B e C obtidos dos indicadores energéticos  $\pi_s$  e  $\rho_s$ , de cada coletor e o respetivo fator  $f_{\pi}$  que lhe é característico. Deste modo apenas se farão algumas considerações acerca das parametrizações obtidas.

Na maioria das modelações, os coeficientes  $R^2$  foram superiores ao mínimo admitido, com exceção de  $1-\psi'$  (transformada linear das perdas térmicas totais) para o coletor padrão REH e Intersol TC-H25.

Pode-se assim afirmar que *de forma geral para um qualquer coletor, as curvas de desempenho são ajustáveis a uma forma exponencial*, eq.5.6, embora não em toda a gama de dimensionamento.

## 6 Propostas para regras e operação de um sistema pericial

### 6.1 Conceitos

Existem vários momentos do dimensionamento auxiliado por *software* em que um sistema pericial pode intervir. Na fase de pré-simulação pode-se identificar erros graves de dimensionamento, e a eventual infração de algumas regras de boas práticas e de indicações regulamentares. Pode-se ainda aconselhar valores iniciais de dimensionamento a partir dos quais o técnico fará ajustes. Finalmente na fase de pós-simulação do sistema solar, o sistema pericial pode analisar os resultados (em termos de vários índices de desempenho), avaliar a qualidade do dimensionamento feito e evidenciar problemas que existam, dando origem a novo ciclo de dimensionamento.

### 6.2 Fase de pré-simulação

Na pré-simulação pode ser feito um balizamento para os fatores pertinentes, impedindo o utilizador de efetuar a simulação fora dos limites impostos, sendo que, nalguns casos, podem ser feitas recomendações adicionais em caixas de texto, na interface com o utilizador, e sugeridos valores típicos a introduzir.

#### 6.2.1 Caudal

O aumento de  $\dot{m}$  aumenta a transferência de calor, mas também a potência consumida pela bomba. A partir de um certo valor, não vale a pena aumentá-lo porque o ganho térmico,  $F''$ , deixa de ser significativo (Lebeña e Costa, 2006).

Observando a curva da Fig. 6.1, aceita-se que o valor de  $F''$ , estabilize aproximadamente em 0,95, o que corresponde ao valor 10, na variável independente.

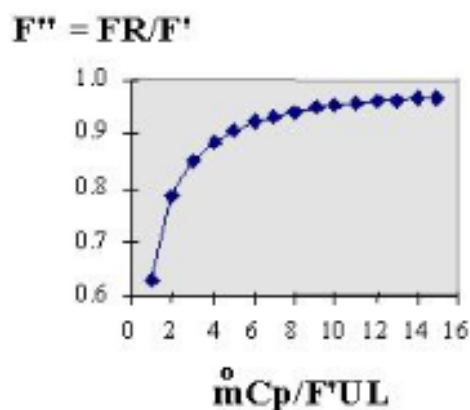


Figura 6.1 - Curva de Ganho térmico ( $F''$ ) – retirado de Lebeña e Costa, 2006.

Desta relação, retira-se que:

$$\dot{m} = \frac{10 F' U_L}{C_p} \quad (6.1)$$



Em que  $F'$  é a eficiência da alheta no coletor e  $U_L$  o coeficiente global de perdas do coletor, expresso em  $W/m^2K$ .

Na mesma figura, observa-se que:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} \quad (6.2)$$

Em que  $F_R$  é o fator de remoção de calor, em  $W/m^2K$ .

Considerando  $F'' = 0,95$ , então  $F' = \frac{F_R}{0,95}$ . No Solterm 6, a recomendação de  $\dot{m}$  poderá ser dada com base na eq. 6.1, da seguinte forma:

$$\dot{m} = \frac{10,5 F_R U_L}{C_{p,f}} \quad (6.3)$$

Onde,

$$F_R U_L \approx a_1 \quad (6.4)$$

Aqui a capacidade calorífica do fluido com anticongelante,  $C_{p,f}$ , é obtida por interpolação em tabela de dados experimentais; e o fator  $F_R U_L$  é um coeficiente de desempenho multiplicado por perdas térmicas lineares que é obtido a partir da linearização da equação (quadrática) de rendimento 2.3.

Portanto  $\dot{m}$  depende do tipo de coletor e do  $C_{p,f}$  do fluido térmico, que por sua vez é função da sua temperatura e da percentagem de anti congelante.

### 6.2.2 Tubagens

Quanto às dimensões das tubagens no circuito primário podem ser especificados por defeito os valores recomendados pela Norma EN 12976 (dependente de  $\dot{m}$ ), para  $d_1$ , e  $h_1$ . Sendo que no caso das espessuras ( $h_1$  e  $h_2$ ), estas são compatíveis com os requisitos gerais mínimos para o isolamento de redes de transporte de fluidos, de acordo com a tabela I.07 da Portaria n.º 349-B/2013, que como se pode verificar na tabela 6.1 terá de haver um isolamento mínimo de 10 mm.

Tabela 6.1 – Espessuras mínimas de isolamento de tubagens (mm). Portaria n.º 349-B/2013 Tabela I.07

TABELA I.07

Espessuras mínimas de isolamento de tubagens (mm)

Diâmetro (mm)	Fluido interior quente				Fluido interior frio			
	Temperatura do fluido (°C)				Temperatura do fluido (°C)			
	40 a 65 (1)	66 a 100	101 a 150	151 a 200	-20 a -10	-9,9 a 0	0,1 a 10	> 10
$D \leq 35$	20	20	30	40	40	30	20	20
$35 < D \leq 60$	20	30	40	40	50	40	30	20
$60 < D \leq 90$	30	30	40	50	50	40	30	30
$90 < D \leq 140$	30	40	50	50	60	50	40	30
$D > 140$	30	40	50	60	60	50	40	30

(1) Para efeitos de isolamento das redes de distribuição de água quente sanitária (redes de sistemas secundários sem recirculação), pode-se considerar um valor não inferior a 10mm.

Em relação aos comprimentos das tubagens no circuito primário, adotaram-se as medidas de Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b, concretizando são:

- Distância da saída do depósito às bombas = 5 m;
- Distância das bombas à entrada dos coletores = 10 m;
- Distância da saída dos coletores ao depósito = 15 m.

Finalmente, quanto às tubagens do circuito de distribuição, especifica-se:

- Distância da saída do depósito ao ponto de consumo = 10 m
- Diâmetro = 0,018 m (18 mm)

O material de isolamento das tubagens, no circuito primário e secundário, pode ser iniciado com “poliuretano”.

### 6.2.3 Potência de bombagem

A potência de bombagem da bomba de circulação,  $P_{bomb}$ , pode ser recomendada segundo a eq. 6.5 como vem em Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b:

$$P_{bomb} = 25 + 2A \quad (6.5)$$

## 6.3 Aconselhamento da configuração inicial

Aqui pretende-se dar ao projetista um ponto de partida razoável para começar o seu dimensionamento. Dos numerosos ensaios com várias condições climáticas, de consumo, etc., extraiu-se heurísticamente o conjunto de especificações que a seguir se apresenta.

### 6.3.1 Número de coletores

A base para todas as recomendações é obtida considerando um valor de 15 para o parâmetro mais importante do dimensionamento, a razão  $A/V'$  entre a área de coletores e o volume de armazenamento (em  $m^2/100l$ ),

$$A/V' = 1,5 \quad (6.6)$$

e portanto o número de coletores a instalar,  $n_{col}$ , é:

$$n_{col} = \frac{A}{A_a} \quad (6.7)$$

Para o cálculo da contribuição mínima de FER no REH, a equação 6.7 calcula o número de coletores-padrão a especificar, mas a fórmula seria aplicada para qualquer coletor.

### 6.3.2 Características do depósito

Os parâmetros  $V$ ,  $h_{ext}$ ,  $d_{ext}$  e  $U_{dep}$  poderão ser recomendadas pelas equações:

$$V = n_{\text{frações}} \times V_{\text{dep}} \quad (6.8)$$

Onde  $V_{\text{dep}}$  é recomendado em 0,06 m<sup>3</sup> por pessoa (ou 60 l).

$$h_{\text{ext}} = 1 + \sqrt{V_{\text{dep}}} \quad (6.9)$$

$$d_{\text{ext}} = 2 \sqrt{\left[ \frac{V_{\text{dep}}}{\pi(h_{\text{ext}} - 0,08)} \right]} + 0,08 \quad (6.10)$$

E

$$U_{\text{dep}} = 0,16\sqrt{V_{\text{dep}}} \quad (6.11)$$

Como a eq. 6.8 mostra, no caso de existir mais do que uma fração (independentemente da tipologia do edifício), implica que o volume total de armazenamento é dividido pelo número de frações em que cada uma apresenta um depósito com o mesmo volume. As eqs. 6.8 a 6.10 foram adotadas por defeito, de Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b. Apesar da eq. 6.11 também o ser, segue originalmente (com aproximação às décimas) a regra de boa prática de 1 W/m<sup>2</sup>K para  $U'_{\text{dep}}$ , como vem referida em Carvalho, 1998.

Para o(s) depósito(s) deve ainda recomendar-se a temperatura máxima de operação, 99 °C e por defeito a posição vertical uma vez que possibilita a estratificação e por consequência um desempenho energético mais adequado. Por fim, as paredes do(s) depósito(s) podem ser iniciadas por “aço inox”.

### 6.3.3 Limites da relação A/V'

A razão A/V' obedece ainda a certos limites via vários critérios de boas práticas:

- Pretendendo-se um regime quase-estacionário não turbulento nos fluxos de massa no depósito, é garantido a cada passo de tempo que no máximo apenas 10% de V seja renovado, a partir da inequação:

$$\frac{\dot{m} \times A \times 5 \times 60s}{V} \times 100\% < 10\%$$

- Evita-se que as perdas térmicas sejam exageradas e assegura-se que haja volume suficiente para acumular a energia diária:

$$V > \frac{2}{3} \times L$$

- Evita-se uma inércia térmica exagerada do depósito, e assegura-se uma subida de temperatura suficiente para evitar recurso constante ao sistema de apoio:

$$V < 3 \times L$$

- Assegura-se que pelo menos uma passagem de volume de fluido circulante seja equivalente ao da água armazenada (no dia mais curto do ano):

$$V > 8 \times \dot{m} \times 3600s$$

Permite-se uma certa flexibilidade nos critérios anteriores tendo em conta variações de consumo e caudal e equipamento comercial disponível. 10% a menos do mínimo volume recomendado, 10% a mais do máximo volume recomendado.

Pela conjugação das condições anteriores, conclui-se que os limites superior e inferior de  $V$  podem não ser definidos sempre pelo mesmo critério, porque dependem do consumo mas sobretudo de  $\dot{m}$  e portanto a gama aceitável de  $A/V'$  varia de coletor para coletor.

#### 6.3.4 Outros itens

Outras regras periciais para a configuração aconselhada vêm de regras de boas práticas, condições padrão ou de atribuição a alguns valores típicos como vem em Costa e Aguiar, 2013 a, 2013 b.

Assim a percentagem de anticongelante no fluido de transferência pode ser iniciada por defeito em 25% e 70%, para um ou mais permutadores.

O sistema de apoio por defeito poderá ser “caldeira a gás natural” e o tipo de montagem “ao depósito”, ou seja incorporado, o que implica que a estratégia de controlo seja “temporizada”, i.e., o apoio aquece apenas o topo do depósito quando as necessidades de consumo não podem ser supridas pela energia solar. Para além disso, a estratégia de controlo “termostática” desperdiça muita energia e não é permitida no contexto da SCE.

Na interface com o utilizador, podem existir caixas de texto apenas informativas para que o utilizador saiba das várias opções de que dispõe no dimensionamento, e caixas de texto adicionalmente restritivas, aconselhando-o a limitar alguns *inputs*, dentro das regras periciais definidas.

#### 6.4 Fase de pós-simulação

O cumprimento das regras periciais na pré-simulação não garante por si só um desempenho energético adequado, e de qualquer forma pode haver margem de manobra na otimização do sistema. Esta etapa não pode ser prescritiva, terá sim o objetivo de identificar possíveis pontos

de melhoria e aconselhar o utilizador a alterar o que poderá estar a provocar resultados menos satisfatórios.

A fração solar é o indicador principal de avaliação de desempenho. No geral procura-se que  $40\% \leq f_s \leq 90\%$ . Abaixo de 40% o sistema ou estará subdimensionado ou muito provavelmente o clima não é adequado para o uso de um sistema solar térmico. Valores acima de 90% (em base anual) indicam com frequência que o desenho do sistema esteja sobredimensionado, com excesso de captação de energia no verão. No entanto, trata-se apenas de valores guia. Em certos casos, tais como cargas noturnas ou cargas fortemente sazonais (concentradas no verão ou no inverno), esta indicação não é adequada. De qualquer modo, é sempre insuficiente utilizar  $f_s$ , como critério único de dimensionamento (Aguiar e Coelho, 2012).

Em relação a  $\pi_s$ , valores muito baixos, grosso modo abaixo de 200 kWh/m<sup>2</sup>, indicam de facto quase sempre um dimensionamento incorreto; mas valores elevados (acima de 900 kWh/m<sup>2</sup>) não constituem, por si só, a garantia de um bom dimensionamento. A questão é a de que seria possível obter uma elevada produtividade por subdimensionar o painel e sobre dimensionar o armazenamento (independentemente das questões económicas). A principal utilidade deste índice é pois a comparação entre soluções diversas para um mesmo sistema, como diversos equipamentos comerciais propostos, principalmente coletores (Aguiar e Coelho, 2012).

O valor de  $\rho_s$ , trata-se de uma indicação interessante como guia para dimensionamentos, porque é menos dependente dos detalhes do consumo, e em particular do nível de recurso solar, do que  $f_s$  ou  $\pi_s$  (Aguiar e Coelho, 2012). Um sistema bem dimensionado terá tipicamente  $40\% \leq \rho_s \leq 90\%$  conforme as características do clima e da carga térmica. Mais uma vez, esta gama é indicativa e não é adequada por exemplo para cargas fortemente sazonais ou predominantemente noturnas, etc.

Tipicamente, é razoável que  $\psi$  varie entre os 10% e os 20%, no entanto, tal como com os restantes indicadores, este não é um intervalo rígido. Por exemplo, um sistema solar térmico montado numa habitação de férias só utilizada intermitentemente (e em meses de verão), apresentará valores de  $\psi$  elevados. Neste caso, o sistema acumula água quente durante os dias sem ocupação, portanto é propenso a perdas térmicas elevadas no armazenamento. No entanto, isso não significa necessariamente que o sistema esteja mal dimensionado.

Assim, em termos apenas energéticos, procuram-se sistemas cujos valores de  $f_s$ ,  $\pi_s$ , e  $\rho_s$  sejam elevados e apresentem valores de  $\psi$  baixos. Porém, espera-se que sistemas com fração solar muito elevada, apresentem perdas térmicas elevadas e rendimento e produtividade baixas. Em suma, o projetista deve não só avaliar cada indicador energético em separado como em conjunto, procurando o melhor equilíbrio possível entre eles.

Enfim, do ponto de vista de um sistema pericial, devem ser encontradas e quantificadas zonas de bom dimensionamento multicritério, através de gamas definidas para cada indicador, para cada tipo de sistema em análise. Não existe porém um dimensionamento ótimo único para cada caso, mas sim alternativas para as quais se obtêm resultados aceitáveis. Reforça-se assim a ideia referida anteriormente, de que tendo em conta as questões económicas ou

constrangimentos práticos, não convém constranger demasiado a liberdade do projetista no seu dimensionamento.

## **6.5 Implementação operacional**

As configurações iniciais aconselhadas já apresentam um desempenho razoável nos vários indicadores energéticos.

Os estudos de sensibilidade procuraram, partindo dessa base, diferenciar no efeito provocado pela alteração de uma variável (tipo de coletor, tipo de clima, etc...) os limites que se poderiam aceitar e os que indiciavam maus dimensionamentos. Nesta secção pretende-se concretizar com regras periciais - sejam de aconselhamento na interface com o utilizador e/ou de balizamento - as análises realizadas nos estudos exploratórios e de parametrização. Mais uma vez reforça-se a ideia que as regras criadas não podem ser demasiado restritivas.

Nem todas as explorações (separadas pelas várias figuras) deram origem a regras periciais, essencialmente por (i) não existirem regularidades suficientes entre as curvas de um determinado indicador energético que permitam retirar conclusões objetivas, por (ii) as curvas não acrescentarem informação relevante que possa ser aproveitada para a criação de algum tipo de limitação numérica ou conselhos úteis ao projetista e por (iii) existir explorações com informação redundante com outros casos analisados.

Paralelamente foram encontradas regras de âmbito mais geral (razão pela qual serão abordadas primeiro) e que pode ser aplicado na maior parte dos casos sem grandes restrições, como sejam as generalizações que resultaram da relação entre indicadores energéticos, para os diferentes estudos exploratórios realizados.

### **6.5.1 Relação entre indicadores energéticos**

Na secção 6.4, os valores máximos e mínimos de cada indicador resultaram em intervalos largos mas é possível restringi-los, considerando as condições de referência adotadas neste trabalho.

Das Fig. 5.23 a 5.26 verificou-se que entre  $\pi_s$  e  $\rho_s$  o declive da recta é igual, exceto na recta correspondente à região do Cávado. De todos os estudos de sensibilidade realizados pode-se afirmar que os dimensionamentos não devem apresentar valores de  $\rho_s$  inferiores a 30%, no entanto poderão ser aceites valores até 25% sem que o sistema pericial faça algum aviso (isto claro se os outros indicadores apresentarem valores razoáveis), sendo este um intervalo de segurança. De 25% a 30% de  $\rho_s$  correspondeu sempre a uma gama de  $\pi_s$  entre 450 a 550 kWh/m<sup>2</sup>, que por sua vez será a margem mínima admitida de  $\pi_s$  no dimensionamento. É necessário frisar que estes valores são válidos apenas para Portugal Continental, já que em climas com uma componente de radiação difusa acentuada (i.e. mais nublados) a gama de mínima de  $\pi_s$ , corresponderá (para as mesmas condições iniciais) a valores superiores a 30% de  $\rho_s$ . Neste sentido, pode-se afirmar que sistemas solares térmicos com baixa produtividade e rendimento razoável podem ser tidos como aceitáveis, mas o contrário já não será válido.

Uma vez que  $f_s$  é o indicador energético mais importante, procurou-se limitar os restantes indicadores de acordo com os próprios limites razoáveis de  $f_s$  consoante as regularidades encontradas. No entanto, não existem regularidades suficientes nas curvas que relacionam  $f_s$  e  $\rho_s$  que permitam limitar um em função do outro de forma genérica. Tipicamente o maior decaimento de  $\rho_s$  (geralmente a partir 30%) dá-se entre os 80% e os 90% de  $f_s$ . Do mesmo modo, uma limitação inferior de  $f_s$  e superior de  $\rho_s$ , também não é possível ser encontrada apenas analisando os estudos que os relacionaram.

Da relação entre  $f_s$  e  $\psi$ , a diferença nos métodos de cálculo entre as versões 6.0.0.24 (estudos de clima, temperatura de consumo e perfil de consumo) e 6.0.0.30 (estudo de coletores) não permitiu uniformizar uma relação comum no comportamento das curvas. Ainda que a Fig. 5.43 denote regularidades nas curvas  $f_s$  Vs.  $\psi'$  (tendencialmente sobrepostas umas às outras), tentou-se parametrizar todos os 64 pontos obtidos numa única curva de ajuste de modo a obter-se uma equação geral que identificasse o comportamento destes dois indicadores com o aumento de área, independentemente do coletor utilizado. A curva que se ajustou melhor era do tipo polinomial de 2º grau (ou superior) com  $R^2 = 0,94$ , ou seja um erro médio superior a 5% considerando toda a gama  $A/V'$  admitida nos estudos. Porém a dispersão de valores com o tipo de coletor é ainda demasiada para uma boa regra pericial. Crê-se que poderia ser obtida se se restringir a gama  $A/V'$  para valores médios, entre  $1,5 \text{ m}^2/100 \text{ l}$  e  $2,5 \text{ m}^2/100 \text{ l}$ .

### 6.5.2 Sensibilidade dos indicadores à razão $A/V'$

Com auxílio das Fig. 5.5 e 5.6 e da análise da subsecção 6.5.1 podem-se retirar as seguintes regras periciais:

- Se  $A/V' \leq 1,50 \text{ m}^2/100 \text{ l} \wedge f_s \leq 35\%$ , seria aconselhado ao projetista que aumente a área de coletores.
- Se  $A/V' \geq 2,50 \text{ m}^2/100 \text{ l} \wedge f_s \geq 90\% \vee \rho_s \leq 25\% \vee \pi_s \leq 400 \text{ kWh/m}^2$ , seria aconselhado ao projetista que diminua a área de coletores.
- Se  $A/V' \geq 2,50 \text{ m}^2/100 \text{ l} \wedge \psi \geq 30\%$  seria aconselhado ao projetista que verifique a capacidade do(s) depósito(s).

Note-se que os intervalos de  $A/V'$  são função do tipo de coletor, neste caso o coletor padrão. Ainda assim uma vez que para fins regulamentares é necessário aferir o desempenho de um sistema solar térmico partindo de coletores padrão, como base de um projeto, estas regras poderiam funcionar como um guia inicial.

Nas condições impostas consideram-se margens de segurança, tanto nos indicadores energéticos como na gama  $A/V'$ , que vão para além da leitura das Fig. 5.5 e 5.6.

### 6.5.3 Condicionante clima

Foram ainda estudadas outras regras periciais para detetar dimensionamentos inadequados, tendo em conta a influência de cada variável estudada (seja o clima, temperatura de consumo

ou perfil de consumo) no desempenho dos sistemas, como demonstraram as análises de sensibilidade. O processo consistiu em calcular para cada um dos 11 pontos A/V' o intervalo admissível para dois dos indicadores energéticos mais relevantes. Aos valores obtidos para cada limite foram acrescentados (ou subtraídos) 5% como margem de flexibilidade.

No estudo exploratório do clima, as regiões NUTS III tidas como casos extremos foram o Cávado e o Algarve. Os indicadores analisados foram  $\pi_s$  que foi selecionado em detrimento de  $\rho_s$  por ser sensível ao clima e  $f_s$ . Pode-se observar graficamente a limitação das curvas, nas Fig. 6.2 e 6.3.

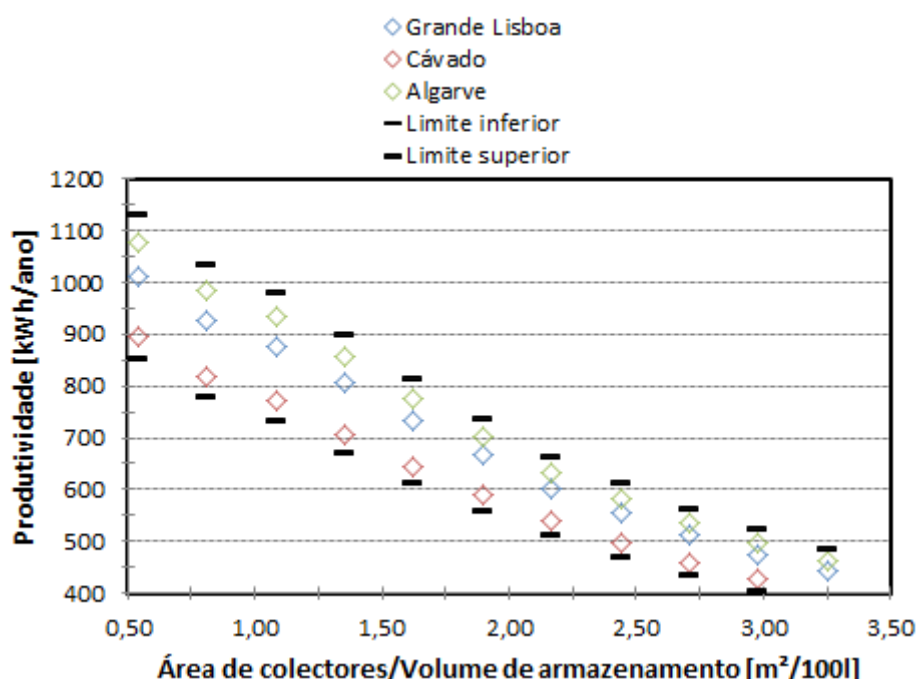


Figura 6.2 – Curvas limite de produtividade com influência do clima

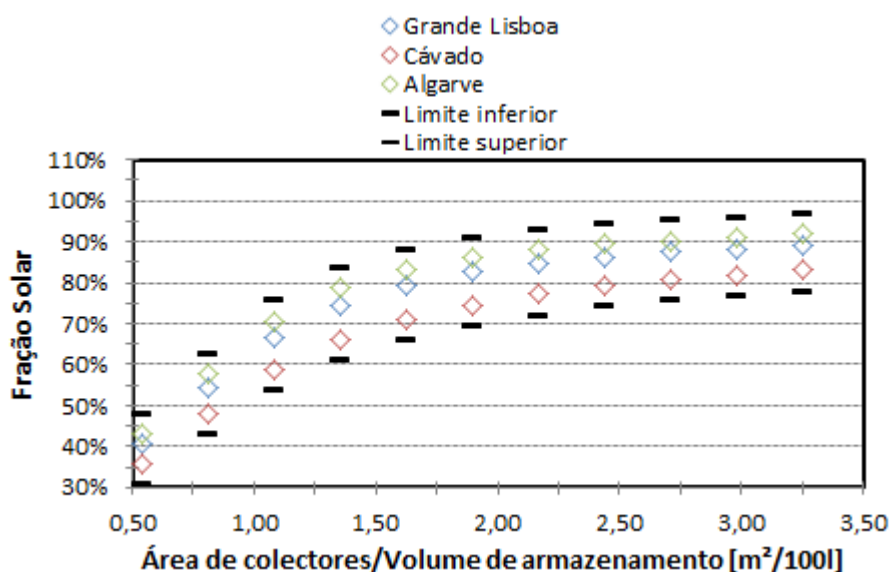


Figura 6.3 – Curvas limite de fração solar com influência do clima



**Tabela 6.2 - Intervalos aceites de produtividade e fração solar - Influência do Clima**

$A/V'$ [m <sup>2</sup> /100 l]	$\pi_s$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	$f_s$
0,54	[852, 1130]	[31%, 48%]
0,81	[778, 1036]	[43%, 63%]
1,08	[732, 982]	[54%, 76%]
1,35	[672, 901]	[61%, 84%]
1,63	[613, 815]	[66%, 88%]
1,90	[560, 737]	[70%, 91%]
2,17	[511, 664]	[72%, 93%]
2,44	[471, 611]	[74%, 94%]
2,71	[435, 564]	[76%, 95%]
2,98	[405, 524]	[77%, 96%]
3,25	[378, 486]	[78%, 97%]

Da Tabela 6.2, retiram-se os intervalos de  $\pi_s$  e  $f_s$  que poderiam ser aceitáveis pelo SolTerm em cada  $A/V'$ . Fora dos mesmos e considerando as condições padrão adotadas, o sistema pericial poderia aconselhar o utilizador a ajustar a configuração do sistema solar térmico para a região NUTS III selecionada, ou simplesmente avisar que a região NUTS III pode não ter sido corretamente selecionada. Reafirma-se que este estudo está apenas circunscrito a Portugal Continental.

#### 6.5.4 Condicionante temperatura de consumo

Os indicadores energéticos em causa aqui são  $f_s$  e  $\psi$  por serem os que denotam maior sensibilidade com  $T_L$ . No entanto, nos balizamentos feitos para este caso houve a necessidade de adotar duas exceções nas curvas limite. No caso do limite superior de  $f_s$  admitido, ao invés de se ter dado uma margem de 5% à curva de 40°C, deu-se a mesma margem para a curva de 50°C pois no caso da primeira tal resultaria em valores de fração solar elevadíssimos (maiores que 97%) em zonas de sobredimensionamento, o que se poderia revelar pouco eficaz na deteção de desempenhos inadequados. Já no caso da curva de limite inferior para  $\psi$ , a margem de -5% não foi dada à curva de 70°C (mas sim a 60°C), primeiro por não ser ajustável à eq. 5.6 (o  $R^2$  é aproximadamente igual a 0,77) mas principalmente por apresentar um comportamento quase constante de ponto para ponto  $A/V'$ , o que por si só indica que já se está longe de um dimensionamento adequado, não sendo frutífero dar-se mais margem de manobra a partir daí. Por uma questão de espaço não serão apresentados graficamente as curvas e os limites a partir daqui, apenas as tabelas com os resultados.

**Tabela 6.3 - Intervalos aceites de fração solar e perdas térmicas – Sensibilidade à temperatura de consumo**

$A/V'$ [m <sup>2</sup> /100 l]	$f_s$	$\psi$
0,54	[21%, 45%]	[3%, 11%]
0,81	[29%, 59%]	[3%, 16%]
1,08	[37%, 72%]	[4%, 21%]
1,35	[43%, 79%]	[5%, 25%]

1,63	[49%, 84%]	[6%, 28%]
1,90	[54%, 88%]	[7%, 30%]
2,17	[58%, 90%]	[7%, 31%]
2,44	[62%, 91%]	[8%, 33%]
2,71	[65%, 92%]	[9%, 33%]
2,98	[67%, 93%]	[10%, 34%]
3,25	[69%, 94%]	[10%, 35%]

Considerando os resultados da Tabela 6.3, o sistema pericial aconselharia o utilizador a corrigir a temperatura de consumo fora dos intervalos observados, ou apenas a adaptar a configuração do sistema solar térmico para o  $T_L$  que selecionou.

### 6.5.5 Condicionante perfil de consumo

Neste caso os indicadores energéticos abordados foram  $f_s$  e  $\psi$ . Porém, houve algumas diferenças no cálculo, pois para os primeiros dois pontos  $A/V'$  o valor de  $\psi$  já é inferior a 5% para o perfil de consumo constante das 8h às 17h, por isso não faria sentido o Solterm aceitar valores negativos. Assumiu-se o valor do primeiro ponto como limite inferior e deu-se uma margem de -2% para o segundo ponto  $A/V'$ . Nos restantes valores das duas curvas limite, a margem de 5% foi mantida.

**Tabela 6.4 - Intervalos aceites de fração solar e perdas térmicas – Sensibilidade ao perfil de consumo**

$A/V'$ [m <sup>2</sup> /100 l]	$f_s$	$\psi$
0,54	[35%, 49%]	[1%, 11%]
0,81	[49%, 65%]	[1%, 13%]
1,08	[62%, 77%]	[1%, 15%]
1,35	[69%, 84%]	[3%, 18%]
1,63	[74%, 88%]	[5%, 20%]
1,90	[78%, 91%]	[7%, 21%]
2,17	[80%, 92%]	[8%, 22%]
2,44	[81%, 94%]	[10%, 23%]
2,71	[82%, 94%]	[11%, 24%]
2,98	[83%, 95%]	[12%, 25%]
3,25	[84%, 96%]	[13%, 26%]

Neste caso o perfil de consumo é sempre da responsabilidade do projetista, portanto e acordo com a Tabela 6.4, o sistema pericial aconselhará o projetista a adaptar a configuração do sistema solar térmico para o perfil de consumo que personalizou.

### 6.5.6 Condicionante tipo e modelo de coletor

Como se constatou, não foi possível uma generalização simples das funções que descrevem o desempenho do sistema solar, em função da produtividade limite do coletor. Assim pode-se apenas dizer que para coletores solares *planos*, e nas condições de dimensionamento aconselhadas por defeito, são válidas as aproximações:

$$\rho_{s(i)} \cong f_{\pi i} \rho_{s(REH)} \quad 6.12$$

$$\pi_{s(i)} \cong f_{\pi i} \pi_{s(REH)} \quad 6.13$$

Assim se o projetista tiver liberdade de escolha do coletor a empregar (muitas vezes não é o caso), poderia seja aconselhado a escolher um modelo com  $\pi_{s(max)}$  superior ao escolhido anteriormente.

### 6.5.7 Sistema de Semáforos

Para a fase de pós simulação, foi experimentado um sistema de semáforos, que possibilita de forma mais visual e intuitiva a verificação da qualidade do dimensionamento. Como exemplo, mostram-se dois casos daquilo que se considera um “bom” (Fig. 6.4 e 6.5) e um “mau” desempenho (Fig. 6.6 e 6.7). É importante referir que para fins estatísticos o indicador  $\rho_s$  é função de  $H_y$  em vez de  $G_y$ , como vem na eq. 5.3, daí que apareça sob essa forma na Fig. 6.5. De notar ainda que o indicador denominado “desperdícios” é o índice  $\psi'$ .

Os resultados apresentados nas primeiras duas figuras mostram o desempenho energético de um sistema solar térmico que segue todas as condições padrão recomendadas e regras periciais de aconselhamento inicial.

Na Fig. 6.4 e 6.6, demonstra-se a abordagem que foi dar a perspetiva geral de desempenho de quatro indicadores energéticos, através de uma escala de cores. Já na Fig. 6.5 e 6.7, a abordagem é mostrar um conjunto de barras, de que a mais baixa corresponde a um mau resultado no indicador e a mais alta a um excelente resultado nesse indicador. A vantagem em relação a uma escala de cores é que se pode perceber melhor a margem de manobra que se tem para o ajuste do dimensionamento.

AQS REH	Energia	Índices
Um consumidor, em média 200 l diários a 50°C 3,3 m² de colectores Padrão REH (inclinação 35°, azimute 0°) 1 depósito de 240 l, apoio integrado	Necessidades: 2.971 kWh por ano (energia útil) Consumo do sistema: 3.641 kWh por ano (energia final) - origem solar 2.630 kWh por ano (energia final) - origem no apoio 802 kWh por ano (energia final)	Oeiras rendimento: 46% (sistema solar) produtividade: 809 kWh/m² de coletor fracção solar: 72% (em energia final) desperdícios: 18% (da energia final)

Figura 6.4 – Resultados de simulação num dimensionamento padrão com 5 coletores REH

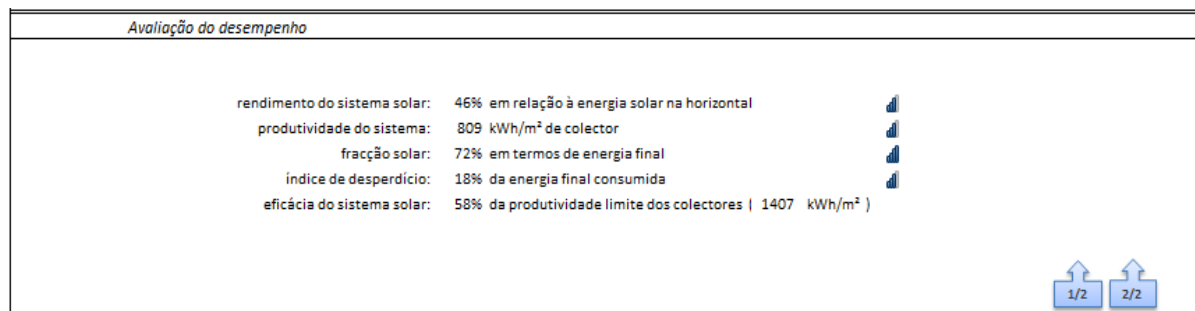


Figura 6.5 – Caixa de avaliação de desempenho padrão com 5 coletores REH

As Fig. 6.6 e 6.7 seguem todas as condições iniciais anteriores à exceção da razão  $A/V'$ , uma vez que se alterou de 5 coletores padrão REH para 11 (o máximo admitido pelo *software*). Assim, pode-se verificar que os resultados obtidos não são satisfatórios em termos energéticos, ainda que as condições mínimas de dimensionamento e cumprimento de normas tenha sido cumprido. Na fase de pré-simulação o não cumprimento desses limites mínimos para além de impedir a simulação, resultará na interface com o utilizador o aparecimento de uma (ou mais) caixas de texto explicativas para que os valores introduzidos estejam no intervalo admitido, informado pelo sistema pericial.

AQS REH	Energia	Índices	Oeiras
Um consumidor, em média 200 l diários a 50°C	Necessidades: 2.971 kWh por ano (energia útil)	rendimento: 27% (sistema solar)	
7,2 m² de coletores Padrão REH	Consumo do sistema: 4.052 kWh por ano (energia final)	produtividade: 476 kWh/m² de coletor	
(inclinação 35°, azimute 0°)	- origem solar 3.405 kWh por ano (energia final)	fracção solar: 84% (em energia final)	
1 depósito de 240 l, apoio integrado	- origem no apoio 355 kWh por ano (energia final)	desperdícios: 27% (da energia final)	

Figura 6.6 - Resultados de simulação num dimensionamento padrão com 11 coletores REH

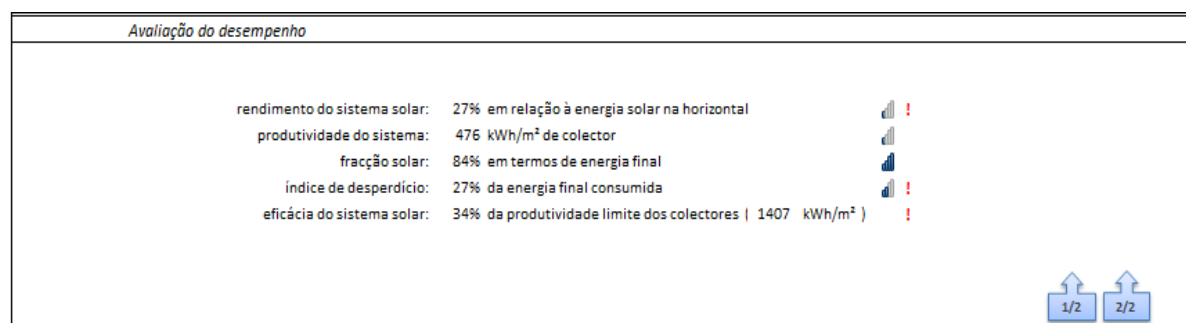


Figura 6.7 - Caixa de avaliação de desempenho padrão com 11 coletores REH

### 6.5.8 Opção de desativação

Uma vez que cada caso prático tem as suas condicionantes próprias (para além das próprias limitações do sistema pericial) que podem escapar à abrangência do SolTerm 6, o utilizador poderá acionar a opção de desligar/ligar o sistema pericial na fase de pós simulação ou algumas caixas de aviso.

Contudo para fins regulamentares necessariamente o relatório de simulação do sistema solar teria de reportar os problemas que o sistema pericial deteta.

## 7 Conclusões

Este trabalho consistiu na criação de sugestões e condições de implementação com vista ao desenvolvimento de um sistema pericial de ajuda ao utilizador, para sistemas solares térmicos, o qual será construído na versão 6 (em fase final de lançamento) do programa de *software* Solterm. A abordagem utilizada foi separar as propostas de implementação em duas etapas fundamentais:

- i. Impedir erros graves de dimensionamento no processo de escolha de componentes do sistema solar térmico ao mesmo tempo sugerir condições iniciais de operação. De forma auxiliar explicar com caixas de texto os balizamentos criados (fase de pré simulação energética).
- ii. Responder a desempenhos energéticos insatisfatórios através do aconselhamento de modificações de um ou mais parâmetros que possam estar a afetar os resultados, preparando assim um novo ciclo de dimensionamento (fase de pós simulação energética).

Para o efeito, decidiu-se adotar no que fosse possível as condições padrão de REH do SCE (DL 118/2013), especificadas para o cálculo da energia mínima a fornecer por sistemas de energias renováveis.

As condições adotadas na primeira fase do trabalho, precedem os estudos de sensibilidade realizados e estão divididas por regulamentos, boas práticas apoiadas pela literatura ou por limites algorítmicos do *software*.

No que respeita a regulamentos, foram adotadas como regras periciais as recomendações de dimensão das tubagens segundo EN 12976 (nos circuitos primário e secundário), a utilização do coletor padrão REH como condição padrão de dimensionamento bem como  $\beta(=0^\circ)$  e  $\alpha(=35^\circ)$ , as temperaturas de água à entrada e no consumo, o cálculo de necessidades AQS estando estes últimos de acordo com a Portaria n.º 349-D/2013 e por fim o perfil de consumo.

As boas práticas que foram aplicadas, constam da configuração inicial do sistema solar. Deste grupo de regras periciais, destacam-se a recomendação de  $A/V'$ ,  $\dot{m}$ ,  $P_{bomb}$ , posição do depósito e suas características térmicas e geométricas (eqs. 6.8 a 6.11), assim como a percentagem de anticongelante e eficácia dos permutadores e tipo de sistema de apoio.

Ainda outras regras respeitam a balizamentos do desempenho esperado em função da razão  $A/V'$  escolhida no dimensionamento e permitem construir mecanismos de informação e alerta ao projetista.

Os balizamentos de  $A/V'$  já assumem a lógica dos limites algorítmicos admitidos (explicados anteriormente) pelo Solterm 6, bem como da análise dos vários estudos de sensibilidade e expressos nas condições impostas para  $V$ , na subsecção 5.4.1. A quantidade de regras limitadoras da razão  $A/V'$  permitem concluir que (i) o sistema pericial deteta com eficácia dimensionamentos inadequados segundo este parâmetro e que (ii) o limite máximo e mínimo de  $A/V'$  pode depender de coletor para coletor, pois também é função de  $\dot{m}$ .

As conclusões genéricas que se seguem foram feitas em função do comportamento da curva  $A/V'$  nos estudos de sensibilidade efetuados às condições “padrão” definidas.

Na razão  $A/V'$  é aconselhado fixar-se primeiro o volume do(s) depósito(s) uma vez que é a variação de  $A$  que influencia mais o desempenho em 3 dos 4 indicadores energéticos (Figs. 5.3 a 5.5).

No caso do indicador  $\psi$  ser demasiado elevado (com os restantes indicadores em intervalos razoáveis), deve-se verificar  $V$  do(s) depósito(s) (Fig.5.6).

O indicador  $\rho_s$  é praticamente insensível ao clima (Fig.5.7), ao contrário de  $\pi_s$  que é tanto maior (em cada incremento de  $A/V'$ ) quanto menor for  $G_y$  (Fig.5.8).

Os indicadores  $\rho_s$  e  $\pi_s$  são pouco sensíveis a  $T_L$  (Figs.5.11 e 5.12), tal não ocorre com  $f_s$  e  $\psi$  pois são fortemente afetadas por este fator (Figs.5.13 e 5.14), ainda que as curvas  $A/V'$  sejam tendencialmente (com exceção de  $T_L=70^\circ\text{C}$ ) paralelas umas às outras.

Os indicadores  $\rho_s$  e  $\pi_s$  são praticamente insensíveis ao perfil de consumo (Figs.5.15 e 5.16) e  $f_s$  (Fig.5.17) pouco sensível, as diferenças acentuam-se sobretudo no indicador  $\psi$  (Fig.5.18).

Para o estudo de coletores, conclui-se que o indicador  $\pi_{s(\max)}$ , pode ser utilizado como referência de um "melhor" ou "pior" desempenho de coletores (Figs.5.19 a 5.22). Pode-se afirmar que quanto mais elevado for este indicador, mais altos são os valores de  $\rho_s$ ,  $\pi_s$ ,  $f_s$  e  $\psi'$ . O projetista/utilizador poderá então contar com esta informação, no processo de escolha do sistema de captação (obviamente desprezando os fatores económicos).

A maioria destes primeiros resultados exploratórios apresentaram regularidades entre curvas  $A/V'$ , figura a figura, tendencialmente paralelas umas às outras e de aparência exponencial, tornando por isso viável a construção de regras periciais.

Na relação entre indicadores energéticos, dois a dois, conclui-se que  $\rho_s$  é redundante com  $\pi_s$ , com a exceção de quando se comparam diferentes climas, uma vez que um não depende do clima e o outro depende. Na prática todas as relações entre  $\pi_s$  e restantes indicadores energéticos é desprezável (com exceção do estudo de sensibilidade do clima), ainda que os resultados se apresentem nas subsecções 5.8.4 e 5.8.5.

Com o aumento da razão  $A/V'$  o  $f_s$  aumenta ao passo que o  $\rho_s$  diminui. Esta relação entre indicadores é no entanto complexa, pelo que se pode observar pelas Figs. 5.27 a 5.30, não sendo praticável retirar regras periciais desta relação.

Na relação entre  $\rho_s$  e  $\psi$  as conclusões são similares (Figs. 5.31 a 5.34).

A curva  $A/V'$  de  $f_s$  indica que existe para cada caso, uma zona de estabilização (grosso modo a partir dos 80%) cujo aumento de área não compensa o seu acréscimo, uma vez que os outros indicadores energéticos tendem a apresentar (comparativamente) um decréscimo acentuado do seu desempenho.

As curvas  $A/V'$  nos indicadores  $\rho_s$  e  $\pi_s$  são diretamente ajustáveis à curva exponencial de equação 5.6, enquanto que os indicadores  $f_s$  e  $\psi$  são-no com uma transformada linear simples

de equações 5.7 e 5.8, respetivamente. Na maioria dos casos estes ajustes foram correspondem a um  $R^2$  mínimo de 0,99, as exceções são no caso de  $\psi''$  para  $T_L=60^\circ\text{C}$  e  $T_L=70^\circ\text{C}$  e perfil de consumo constante das 8h às 17h - 10% e para a transformada  $1-\psi'$  (estudo de coletores) para os coletores Intersol TC-H25 e padrão REH. Excluindo o estudo de sensibilidade de coletores, é possível afirmar que curvas  $A/V'$  que não sejam ajustáveis à equação 5.6 indicia dimensionamentos inadequados, o problema é impor esta condição no *software* Solterm 6, uma vez que se torna pesado verificar os vários pontos da curva para se aferir a tendência exponencial que geralmente apresenta.

Apesar da viabilidade de modelação da curva  $A/V'$  à eq. 5.6, pouco mais se pôde retirar dos resultados e parâmetros A, B e C uma vez que estes não seguem comportamentos regulares à variação dos fatores em análise. No caso do clima os bons resultados abrem no entanto boas perspectivas numa possível sistematização das curvas de região para região NUTS III, se se incluir outros fatores de análise que não apenas  $G_y$ , pois apenas com esta variável as tendências de variação dos parâmetros A B e C para certos indicadores são notórias.

Conclui-se ainda que os parâmetros B (indicador do decaimento da curva) da equação modelizante, foram iguais (com arredondamento às centésimas) entre  $\rho_s$  e  $\pi_s$ , provando a redundância entre eles.

O Sistema Pericial na fase de pós simulação, foi suportado pelas conclusões dos estudos exploratórios, i.e. pelos resultados das simulações, através de regras heurísticas e pelo sistema de semáforos criado decorrente das análises de resultados.

As metodologias utilizadas nesta etapa, para a criação de regras periciais, estão divididas em 4 grupos:

- Relação entre indicadores energéticos – A limitação de indicadores energéticos em valores razoáveis dois a dois, só foi possível entre  $\pi_s$  e  $\rho_s$ , uma vez que o intervalo entre 25% e 30% de  $\rho_s$  correspondeu a valores de  $\pi_s$  entre 450 a 550 kWh/m<sup>2</sup>, poder-se-á então afirmar que bastará apenas que um deles esteja nesses intervalos (ou com valores inferiores), para que seja dado um aviso ao projetista de que o dimensionamento é inadequado. As restantes relações entre indicadores energéticos não apresentaram regularidades suficientes para a criação de regras periciais.
- Estudo de sensibilidade da razão  $A/V'$  – Aqui aconselha-se o projetista a aumentar/diminuir a área de coletores ou volume de armazenamento, se tiver margem para o fazer dentro dos limites algorítmicos admitidos pelo *software* e se os valores dos indicadores energéticos forem demasiado baixos ou altos (subsecção 6.5.2)
- Estudos de sensibilidade do clima, temperatura de consumo e perfil de consumo – Uma vez identificados os valores máximos e mínimos em cada um dos casos de cada estudo, foi adicionado ou subtraído nos dois indicadores energéticos com maior sensibilidade o valor de 5%, fora do qual o *software* avisa o projetista que deve voltar a configurar o fator em análise, considerando as condições padrão definidas. Este processo é transversal a todos os 11 pontos  $A/V'$ .



- Estudo de sensibilidade a coletores comerciais – Foi possível deduzir o comportamento das curvas  $A/V'$  de um coletor plano comercial, para os indicadores energéticos  $\rho_s$  e  $\pi_s$ , partindo das mesmas curvas mas referentes ao coletor padrão REH e do fator  $f_\pi$ . Ver eqs. 6.12 e 6.13. Ainda assim a hipótese testada na sub secção 5.9.4, apenas foi parcialmente viabilizada, uma vez que não se pôde generalizar para os indicadores  $f_s$  e  $\psi$ , nem para qualquer coletor CPC ou de tubos de vácuo, pois o comportamento térmico deste tipo de coletores exige um estudo mais aprofundado.

Trabalhou-se por fim, num sistema de semáforos que pretende mostrar os valores dos 4 indicadores energéticos principais obtidos pós simulação mas de forma intuitiva para que assim o projetista tenha a percepção, mais rápida, da margem de que dispõe para eventuais otimizações no dimensionamento ou por exemplo se o desempenho energético é equilibrado nos 4 indicadores. Pode ainda consultar o valor de  $\pi_{s(max)}$ , característico de cada coletor.

O sistema pericial para o qual se contribuiu no âmbito desta tese tem as suas forças e fraquezas, é possível porém que tanto de um lado como do outro não tenham sido detetadas todas elas. No que concerne às vantagens identificadas, enumeram-se as principais:

- Evita erros graves de dimensionamento, podendo aumentar a eficácia do projetista no dimensionamento e diminuir o tempo de decisão, na fase de pré simulação;
- Tem a valência de explicar na interface com o utilizador a razão de ser dos limites impostos, que podem ser regulamentares ou de boas práticas;
- Dá-se liberdade ao projetista na tomada de decisão final, o aconselhamento é em grande medida informativo e não prescritivo;
- As numerosas regras periciais criadas, para a pré simulação, a configuração inicial, e a pós-simulação, permite afirmar que para sistemas solares típicos é bastante improvável cometerem-se erros graves de dimensionamento sem que sejam detetados pelo Solterm 6;
- O sistema de semáforos criado na etapa de pós simulação permite ao projetista compreender onde se situa na zona do desempenho energético, através dos vários indicadores energéticos, e de forma bastante intuitiva qual a margem que tem para os ajustes que considere necessários e assim iniciar um novo ciclo do processo de dimensionamento;
- O sistema pericial recomenda uma base inicial fidedigna, que segue as normas regulamentares vigentes e algumas regras de boas práticas apoiadas na literatura especializada e conclusões retiradas dos estudos de sensibilidade;
- No contexto de satisfação de exigências regulamentares um projetista muito provavelmente terá de utilizar a grande maioria das condições iniciais recomendadas, pelo sistema pericial, em particular na avaliação de desempenho mínima com a utilização de coletores padrão do REH;

Já no que respeita às fraquezas do sistema pericial, enumeram-se as principais que foram detetadas neste trabalho:

- Resulta de dois protótipos do Solterm 6, sendo que as diferenças que existem entre eles introduziram incerteza nalgumas conclusões, ou podem ter mesmo impedido de se chegar a uma ou outra regra pericial adicional;
- Não abrange casos especiais, como a utilização de sistemas solares térmicos em casas de verão;
- Não se contemplaram casos onde a fração de radiação difusa é muito elevada (como as Regiões Autónomas);
- Apesar da eficácia do sistema em detetar problemas de dimensionamento e de desempenho energético, não é eficiente nalguns casos pois pode haver sobreposição de regras e isso obscurece as relações causa-efeito;
- Não se estudou a sensibilidade a sombreamentos, à orientação dos coletores e às diferenças entre acumulação centralizada de água ou divisão do volume total de armazenamento pelo número de frações existente;
- Não foi submetido ainda a testes com um número suficiente de potenciais utilizadores;
- Não é aplicável a casos de alguns equipamentos comerciais como kits solares térmicos;
- Dá-se particular destaque a que não foi possível ainda contemplar a perspetiva económica, apenas a perspetiva técnica. Assim é bem possível que a otimização do dimensionamento na perspetiva puramente técnica seja sobrevalorizada pelos utilizadores se o sistema for implementado sem uma vertente de análise económica.

Finalmente, considera-se que o aperfeiçoamento das regras e operação de um sistema pericial a aplicar no Solterm 6 poderá passar por:

- Aprofundar a influência do clima, considerando outros fatores como  $T_a$ ;
- Alargamento a outro tipo de aplicações como kits solares e aplicações industriais ( $T_L$  elevados);
- Estudar a sensibilidade do dimensionamento e dos desempenhos à orientação dos coletores, a sombreamentos, e à configuração do sistema de apoio energético;
- Estudar o desempenho energético de coletores em função de  $T_L$ , na gama total do catálogo, com vista a ajuda na seleção de coletores comerciais;
- Estudar em mais detalhe os casos de coletores CPC e tubos de vácuo, de forma a tentar o alargamento das relações encontradas para coletores planos;
- Implementar uma análise económico-financeira, com cenários económicos (previsões de taxas de juro, tipo de empréstimo, preços da energia convencional, etc.), pois no fundo o retorno económico do sistema solar é que constitui o critério último para o dimensionamento final.

## 8 Referências

MAOTE (2013a). Portaria n.º 349-D/2013 de 2 de Dezembro.

MAOTE (2013b) Portaria n.º 349-B/2013 de 18 de fevereiro.

Carvalho, M. J. (1998). Princípios Gerais para Conceção e Dimensionamento de Sistemas Solares Térmicos Ativos. No âmbito do Curso “Gestão de Energia nos Edifícios”. Lisboa: INETI-ITE, 1998, 4-41.

Lebeña, E. P. e Costa, J. C. (2006). Conversão Térmica da Energia Solar. No âmbito do Curso “Curso de Instaladores de Equipamentos Solares Térmicos”. Lisboa: INETI-ITE, 43-82.

Jackson, P. (1999). Introduction to Expert Systems, Third Edition, Addison-Wesley, Boston.

Turban, E. and Aronson J. (2000). Decision Support and Intelligent Systems, Prentice Hall.

Alves, J., 2005. Avaliação de Desempenho dos Sistemas Periciais, Dissertação para obtenção de grau Mestre, Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior de Economia e Gestão, 28-42.

Perez R., Ineichen P., Seals R., Michalsky J., Stewart R. (1990). *Modeling Daylight Availability and irradiance components from direct and global irradiance*. Solar Energy, col 44, nº 5, pp 271-289.

Santos, M. (1998). Introdução aos Sistemas Periciais, Universidade do Minho.

Aguiar, R. e Coelho, R. (2012). Manual de Instalação e Utilização do *software* Solterm – Versão 5.14. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P. Unidade de Análise Energética e Alterações Climáticas. Lisboa.

Alberto, L. (2013).

Website:[http://www.professorluizalberto.com.br/prof/images/stories/Documentos/FAPEN/2013-1/Aula\\_07\\_-\\_IA\\_-\\_Representao\\_do\\_Conhecimento.pdf](http://www.professorluizalberto.com.br/prof/images/stories/Documentos/FAPEN/2013-1/Aula_07_-_IA_-_Representao_do_Conhecimento.pdf).

Costa, J.P. e Aguiar, R. (2013 a). Validação do *software* SolTerm 6 através de simulações TRNSYS. Parte I - Sistema com um consumidor e apoio energético direto ao depósito, temporizado. Memória Técnica LNEG. Ed. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Lisboa. 38 pp.

Costa, J.P. e Aguiar, R. (2013 b). Validação do *software* SolTerm 6 através de simulações TRNSYS. Parte II - Sistema com dois consumidores e apoio energético direto aos depósitos, temporizado. Memória Técnica LNEG. Ed. Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Lisboa. 37 pp.

D. Rojas, J. Beermann, S.A. Klein and D.T. Reindl (2008). Thermal Performance Testing of Flat-plate Collectors. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison, Madison, WI, United States.

Horta, P., Carvalho, M.J., Collares-Pereira, M., Carbajal, W. (2008). "Long term performance calculations based on steady state efficiency test results: analysis of optical effects affecting beam, diffuse and reflected radiation", Solar Energy, 2008, doi:10.1016/j.solener.

D. Włodarczyk, H. Nowak (2009). Statistical analysis of solar radiation models onto inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland. ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING, Vol. IX 2009 No. 2.

Muneer T. (2004). Solar Radiation and Daylight Models, 2nd edition, Elsevier Butterworth-Heinemann.

Muneer T. (1990). "Solar radiation model for Europe." Building Serv. Eng. Res. Techno., Vol. 11, pp. 153-163.

Reddy, A. (1987). The Design and Sizing of Active Solar Thermal Systems. Clarendon Press, Oxford, UK.

MEI (2008). Despacho n.º 17313/2008 MEI

DL (2013). Despacho n.º 15793-H/2013

EN 12975-1:2006, "Thermal solar systems and components - Solar collectors – Part 1: General Requirements". CEN, Bruxelas.

EN 12975-2:2006, "Thermal solar systems and components - Solar collectors – Part 2: Test Methods". CEN, Bruxelas.

## Anexos

### A. Exemplo de um relatório completo de simulação energética no Solterm 6.0.0.24

As Fig. A.1 e A.2 mostram um exemplo de um relatório completo (em formato PDF) de simulação energética no Solterm 6.0.0.24. O exemplo reporta ao estudo de sensibilidade do clima, neste caso na Zona NUTS III do Grande Porto, com a utilização de dois coletores padrão REH.



Relatório de simulação de desempenho de sistema solar térmico																			1/2
Sumário																			
Grande Porto   Porto		Tipo de carga térmica: AQS RCCTE										Índices de desempenho:							
Um consumidor, em média 200 l diários a 50°C		Energia útil (necessidades): 2.971 kWh por ano										rendimento 56% (sistema solar)							
1,3 m² de coletores Padrão RCCTE 2013		Energia final (consumo do sistema): 3.252 kWh por ano										produtividade 923 kWh/m² de coletor							
(inclinação 35°, azimute 0°)		- fornecida de origem solar 1.199 kWh por ano										fracção solar 37% (em energia final)							
1 depósito de 240 l, apoio integrado		- fornecida pelo apoio 1.965 kWh por ano										perdas térmicas 6% (da energia final)							
Local e clima																			
NUTS III: Grande Porto				Município: Porto				Local: típico desta região				elevação: 95 m				albedo: 20 %			
obstruções do horizonte																			
azimute:	E	-85°	-80°	-75°	-70°	-65°	-60°	-55°	-50°	NE	-40°	-35°	-30°	-25°	-20°	-15°	-10°	-5°	S
altura angular:																			
azimute:	S	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	NW	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	W
altura angular:																			
Configuração do sistema solar																			
(N.B: não são as condições padrão do RCCTE)																			
Sistema solar por medida, em circulação forçada, com 1,3 m² de coletores com inclinação 35° e orientação 0°, e armazenamento de água sanitária com 240 litros, apoio de montagem AO DEPÓSITO com controlo TEMPORIZADO.																			
Circuito primário com 30 m de comprimento, sem permutador externo, tubagens de calibre 10 mm, isolamento em POLIURETANO com 20 mm de espessura.																			
Bombas de 27 W, garantindo um caudal nominal de 46 l/m² por hora, fluido circulante com 25% de anticongelante.																			
2 coletores de modelo Padrão RCCTE 2013.																			
Características principais: área de abertura 0,65 m², coeficientes de perdas térmicas a1 = 4,12 W/m²K e a2 = 0,014 W/m²K², rendimento óptico = 73%.																			
1 depósito (padrão para RCCTE), com capacidade 240 litros, em posição VERTICAL. Características construtivas principais: coeficiente de perdas térmicas global = 2,5 W/°C, paredes em INOX, temperatura máxima de operação 99°C, eficácia de permutador de calor interno de 70%.																			
Apoio energético fornecido por CALDEIRA (GÁS NATURAL) com eficiência nominal 86%.																			
Água quente distribuída por tubagens de calibre 18 mm isoladas por POLIURETANO com espessura 10 mm, com 10 m entre depósito e ponto de consumo.																			
Necessidades de energia																			
Águas quentes sanitárias - padrão RCCTE																			
edifício: ewqe		Residências										T4							
		nº fracções desta tipologia										1							
		nº ocupantes por fracção										5							
		consumo diário por ocupante										40							litros
temperaturas		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez						
abastecimento de água		15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	°C				
pretendida no consumo		50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	°C				
energia diária		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez						
segunda-feira		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				
terça-feira		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				
quarta-feira		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				
quinta-feira		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				
sexta-feira		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				
sábado		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh				

perfil de consumo	domingo	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	8,1	kWh
	hora	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
	(período diurno)	40%	-	-	-	-	-	10%	-	-	-	-	-		
	hora	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6		
	(período nocturno)	40%	10%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Licenciado a: Jorge Menezes (LNEG)

SolTerm 6 pro | 25-10-2013 19:43

Figura A.1 - Relatório de simulação energética no Solterm 6.0.0.24 (1/2) - Condições padrão com 2 coletores (Grande Porto)



Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Relatório de simulação de sistema solar térmico - continuação														2/2
Aproveitamento do recurso solar														
aquecimento ambiente														
radiação solar directa	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual	
horizontal (à superfície)	0,8	1,5	2,4	3,3	4,1	5,1	5,3	4,6	3,4	1,7	1,0	0,6	2,8	kWh/m².dia
incidiria nos colectores, sem obstruções	1,8	2,5	3,3	3,7	3,9	4,5	4,9	4,8	4,3	2,6	2,1	1,3	3,3	kWh/m².dia
incidente nos colectores	1,7	2,5	3,3	3,7	3,9	4,5	4,9	4,8	4,3	2,6	2,1	1,3	3,3	kWh/m².dia
absorvida pelos colectores	1,7	2,4	3,1	3,4	3,5	3,9	4,2	4,5	4,0	2,5	2,0	1,2	3,0	kWh/m².dia
radiação solar global	média	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual	
no topo da atmosfera	4,1	5,6	7,8	10,0	11,6	12,4	12,0	10,7	8,7	6,4	4,5	3,6	8,1	
na horizontal (à superfície)	1,8	2,8	4,2	5,4	6,5	7,4	7,5	6,5	5,0	3,2	2,1	1,4	4,5	
incidiria nos colectores, sem obstruções	2,9	4,0	5,2	5,9	6,3	6,8	7,1	6,8	6,1	4,3	3,3	2,2	5,1	
incidente nos colectores	2,9	4,0	5,2	5,9	6,3	6,8	7,1	6,8	6,1	4,3	3,3	2,2	5,1	
absorvida pelos colectores	2,5	3,5	4,6	5,1	5,3	5,6	5,8	6,0	5,4	3,8	2,9	1,9	4,4	
Desempenho energético														
temperaturas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual	
ambiente	9,9	11,0	12,6	13,9	16,2	19,7	21,8	21,7	20,3	16,9	13,4	11,2	15,7	°C
abastecimento de água	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	°C
base do armazenamento	20	21	24	25	25	26	27	27	26	23	21	19	24	°C
topo do armazenamento	44	45	46	46	46	46	47	47	46	45	45	44	46	°C
pretendida no consumo	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	°C
massas	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual	
pretendida no consumo	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	litros/dia
extraída do armazenamento	196	196	196	196	196	196	196	195	196	196	196	196	196	litros/dia
(adicionada)	4	4	4	4	4	4	4	5	4	4	4	4	4	litros(dia)
balanço de energia	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	anual	
radiação solar incidente	72	101	168	211	261	289	301	263	195	128	81	57	2.411	kWh
radiação solar captada	62	80	116	133	138	146	161	166	143	103	74	48	1.361	kWh
perdas térmicas no circuito primário	2	2	4	4	4	3	3	4	3	2	2	1	35	kWh
consumos parasíticos (bombas)	6	6	8	8	8	7	8	9	8	8	6	5	87	kWh
perdas térmicas no armazenamento	17	18	24	25	27	27	30	30	28	22	18	16	282	kWh
fornecida de origem solar	53	70	101	111	121	129	143	147	127	92	64	41	1.199	kWh
fornecida pelo apoio	215	176	165	149	149	142	146	145	139	142	197	227	1.905	kWh
perdas térmicas na distribuição	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17	kWh
consumo (carga térmica)	252	228	252	244	252	244	252	252	244	252	244	252	2.971	kWh
fracção solar	21%	31%	40%	45%	48%	53%	57%	58%	52%	38%	28%	16%	46%	56%
Avaliação do desempenho														
rendimento do sistema solar:	56%	(em relação à energia solar na horizontal)												
produtividade:	923	kWh/m² de coletor												
fracção solar:	37%	(em termos de energia final)												
perdas térmicas:	6%	(da energia final consumida)												

Figura A.2 - Relatório de simulação energética no Solterm 6.0.0.24 (2/2) - Condições padrão com 2 coletores (Grande Porto)

### B. Características térmicas principais dos coletores estudados

Nas Fig. B.1 e B.2 apresentam-se as características térmicas principais dos coletores solares térmicos que foram utilizados nas simulações e a partir dos quais se fez a respetiva análise de sensibilidade. As imagens foram retiradas do Solterm 6.0.0.30, sendo que os valores apresentados são originários dos respetivos certificados.

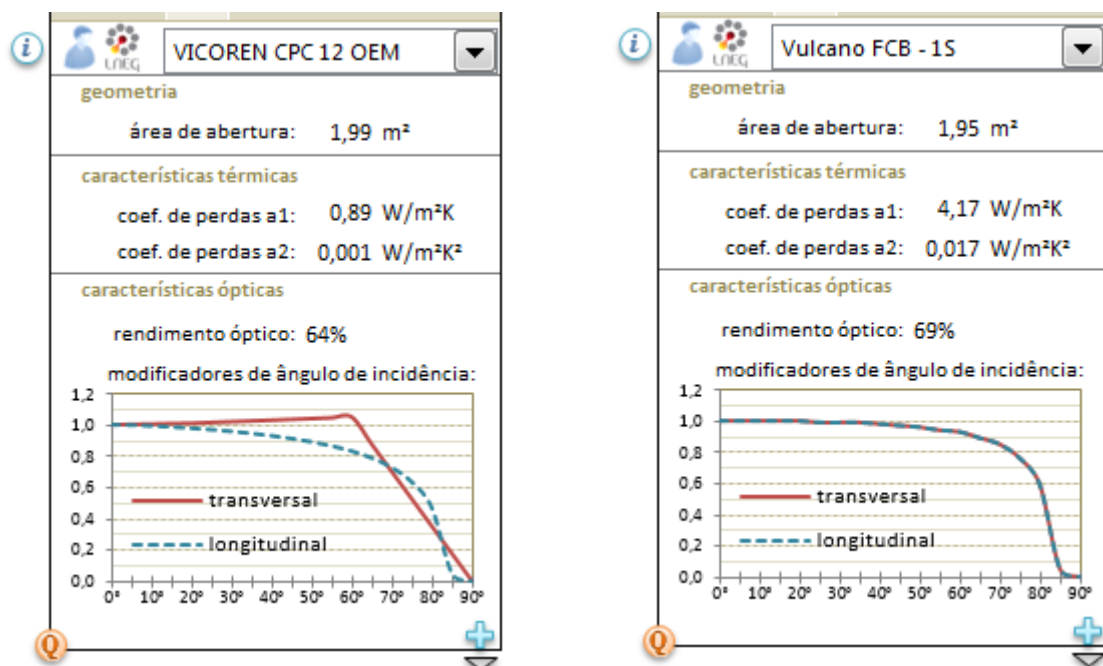


Figura B.1 - Características térmicas principais dos coletores Vicoren CPC 12 OEM e Vulcano FCB - 1S (retirado de Solterm 6.0.0.30).

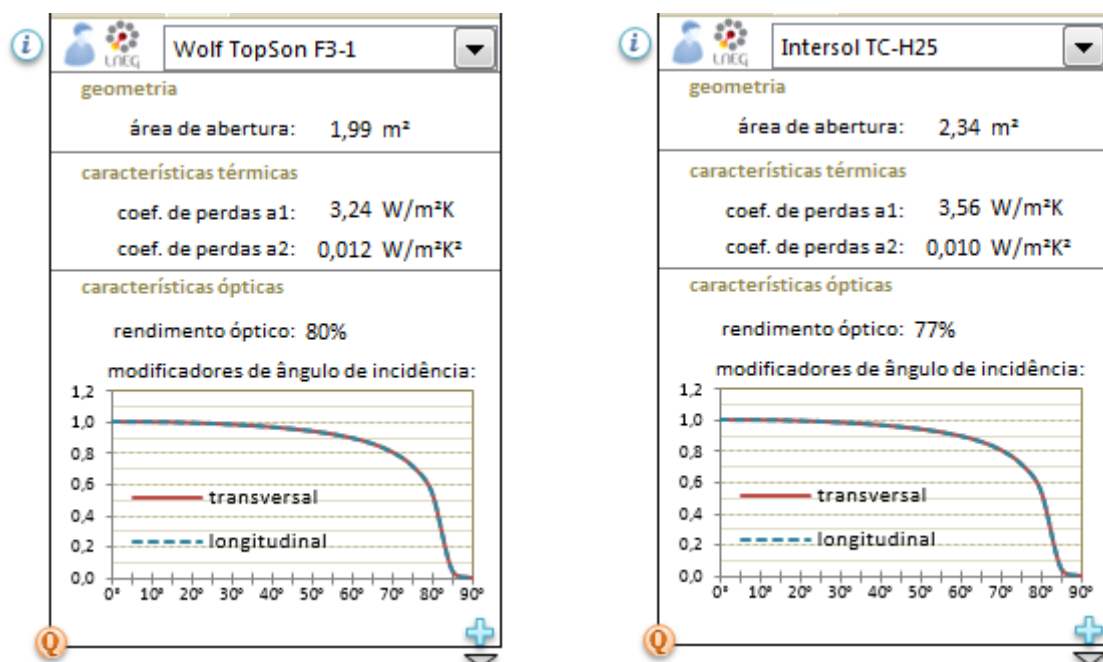


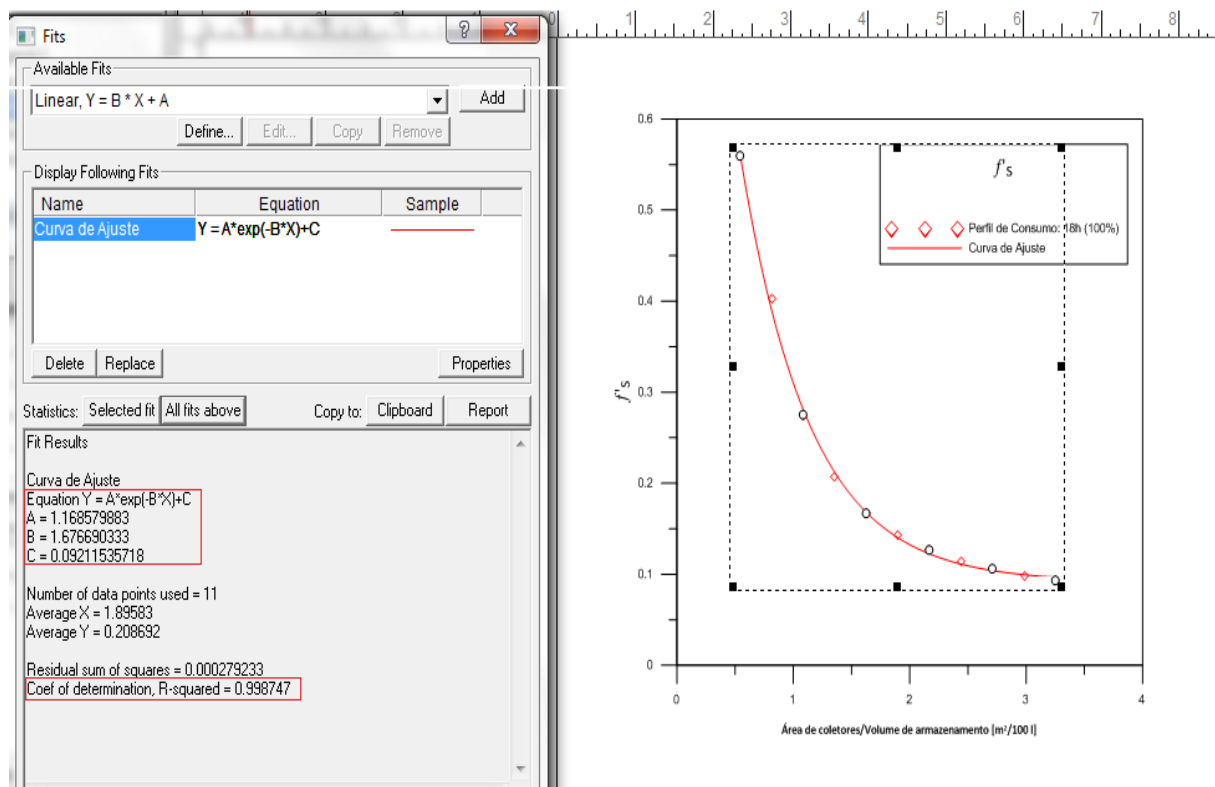
Figura B.2 - Características térmicas principais dos coletores Wolf TopSon F3-1 e Intersol TC-H25 (retirado de Solterm 6.0.0.30).

### C. Exemplo de parametrização no programa de software Grapher 9

Na Fig. C.1 pode-se consultar um exemplo de uma das parametrizações realizadas no Grapher 9 ao longo deste trabalho. O exemplo escolhido foi o do estudo de perfil de consumo (neste caso com consumo diário totalizado às 18h), para a transformada  $f'_s$ . Marcado com retângulos vermelho estão os resultados de modelação mais importantes: as constantes A,B e C da curva de ajuste de eq. 5.6, assim como o coeficiente de determinação  $R^2$  da mesma



curva. De referir ainda que os parâmetros da eq. 5.6 tiveram de ser criados e adicionados à biblioteca de funções do programa.



C.1 - Resultados de parametrização de um caso de estudo "perfil de consumo" - Retirado de Grapher 9.